

ALMA MATER STUDIORUM · UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

Dottorato di Ricerca

INGEGNERIA ENERGETICA NUCLEARE E
DEL CONTROLLO AMBIENTALE

Ciclo XIX

Settore/i scientifico disciplinare di afferenza: ING-IND-20

**METROLOGIA DEI CAMPI
DI RADIAZIONI DI BASSA
ENERGIA**

Presentato da:

Dott.ssa Francesca Mariotti

Coordinatore del Dottorato:

Prof. Ing. Alessandro Cocchi

Relatore:

Dott.ssa Elena Fantuzzi

Esame finale anno 2008

A Leonardo e Linda

Indice

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Introduzione | 1 |
| 1.1 | Stato dell'arte della metrologia delle radiazioni di bassa energia . | 1 |
| 1.2 | Obiettivo della tesi | 3 |
| 1.3 | Struttura della tesi | 4 |
| 2 | L'impianto radiologico: tubo a raggi X SEIFERT ISOVOLT M2 160/0.4-1.5 | 6 |
| 2.1 | Introduzione | 6 |
| 2.2 | Radiazione X: descrizione dell'impianto radiologico | 6 |
| 2.2.1 | Parete schermante: radiazione diffusa | 11 |
| 2.2.2 | Gruppo otturatore: uniformità del fascio | 11 |
| 2.2.3 | Sistema porta filtri | 13 |
| 2.2.4 | Camera a ionizzazione ad aria libera | 18 |
| 2.3 | Messa a punto dell'impianto radiologico: condizioni geometriche . | 18 |
| 2.3.1 | Metodo di allineamento | 19 |
| 2.3.2 | Il banco ottico | 19 |
| 3 | Caratterizzazione di una camera a ionizzazione ad aria libera per il controllo della stabilità dei fasci X di bassa energia | 20 |
| 3.1 | Introduzione | 20 |
| 3.2 | Misura dell'esposizione | 21 |
| 3.3 | Descrizione della camera monitor | 22 |
| 3.4 | Sistema di misura della carica | 25 |
| 3.5 | Sistema di misura dei parametri ambientali | 25 |
| 3.6 | Prestazioni della camera monitor | 26 |
| 3.7 | Determinazione del volume di raccolta della camera | 27 |
| 3.8 | Curva di dipendenza dall'energia della camera monitor | 30 |
| 4 | Determinazione dei dati caratteristici dei fasci ISO 4037-1 di bassa energia con il metodo dosimetrico | 34 |
| 4.1 | Introduzione | 34 |
| 4.2 | Realizzazione dei filtri per i fasci standard ISO 4037-1 | 35 |
| 4.3 | Misure di primo e secondo spessore emivalente (SEV) | 39 |
| 5 | Caratteristiche nominali dei campi di irraggiamento e grandezze dosimetriche associate | 42 |
| 5.1 | Grandezze fisiche in radiometria | 42 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 5.2 | Dipendenza degli spettri fotonici di bassa energia dalla distanza sorgente-rivelatore | 43 |
| 5.3 | Grandezze operative: definizioni | 44 |
| 5.4 | Grandezze operative per la dosimetria individuale: problematiche legate alle basse energie | 56 |
| 6 | Qualificazione della catena spettrometrica | 59 |
| 6.1 | Introduzione | 59 |
| 6.2 | La catena di acquisizione | 59 |
| 6.3 | Il rivelatore al Germanio iperpuro (HPGe) | 60 |
| 6.4 | Perchè un rivelatore al Germanio Ultra LEGE? | 63 |
| 6.5 | Calibrazione del sistema di acquisizione | 64 |
| 6.5.1 | Calibrazione in energia | 64 |
| 6.5.2 | La risoluzione in energia | 69 |
| 6.5.3 | Calibrazione in efficienza | 69 |
| 6.6 | Funzione della modellazione Monte Carlo nello studio dei campi di radiazione fotonica | 72 |
| 6.6.1 | Studio della geometria del rivelatore | 73 |
| 6.6.2 | Determinazione Monte Carlo della curva di efficienza e dello spessore dello strato morto (dead layer) del rivelatore | 77 |
| 6.7 | Acquisizione degli spettri RX sperimentali | 80 |
| 7 | Ricostruzione dello spettro di raggi X primario | 84 |
| 7.1 | Introduzione | 84 |
| 7.2 | Interazione delle radiazioni elettromagnetiche | 84 |
| 7.3 | Funzione di stripping | 86 |
| 7.4 | Frazione dei conteggi persi per diffusione Compton | 87 |
| 7.5 | Frazione di conteggi dovuti al picco di fuga K | 87 |
| 7.6 | Curva di efficienza del rivelatore | 91 |
| 7.7 | Confronto tra le distribuzioni degli spettri degli impulsi e gli spettri ricostruiti | 91 |
| 7.8 | La matrice risposta del rivelatore | 92 |
| 8 | Determinazione dei coefficienti di conversione fra kerma in aria e grandezze operative per spettri X di bassa energia | 97 |
| 8.1 | Introduzione | 97 |
| 8.2 | Considerazioni dimensionali relative allo spettro dei fotoni | 99 |
| 8.3 | Determinazione dei parametri tipici degli spettri | 100 |
| 8.3.1 | Normalizzazione degli spettri alle condizioni di riferimento | 100 |
| 8.3.2 | Determinazione del primo e secondo spessore emivalente . | 101 |
| 8.3.3 | Determinazione dell'energia media dello spettro ricostruito | 102 |
| 8.3.4 | Fattore di Kerma | 103 |
| 8.4 | I coefficienti di conversione | 103 |
| 8.4.1 | Coefficienti di conversione $h(10; R, \alpha^\circ)$ per il fantoccio a slab | 108 |
| 8.4.2 | Coefficienti di conversione $h(0,07; R, \alpha)$ per la pelle | 110 |
| 8.4.3 | Coefficienti di conversione $h(3; R, \alpha^\circ)$ | 112 |

| | | |
|-----------|---|------------|
| 8.4.4 | Coefficienti di conversione $h^*(10; R)$ | 113 |
| 8.4.5 | Coefficienti di conversione $h'(0, 07; R, \alpha^\circ)$ | 116 |
| 8.5 | Parametri caratteristici e loro incertezze | 117 |
| 9 | Risultati | 121 |
| 9.1 | Tabelle riassuntive dei dati caratteristici degli spettri | 121 |
| 9.2 | Distanza sorgente-rivelatore = 50 cm | 123 |
| 9.2.1 | La serie ISO "Low Air-Kerma Rate series" | 123 |
| 9.2.2 | La serie ISO "Narrow-Spectrum series" | 128 |
| 9.2.3 | La serie ISO "High Air-Kerma Rate series" | 133 |
| 9.3 | Distanza sorgente-rivelatore = 200 cm | 138 |
| 9.3.1 | La serie ISO "Low Air-Kerma Rate series" | 138 |
| 9.3.2 | La serie ISO "Narrow-Spectrum series" | 143 |
| 9.3.3 | La serie ISO "High Air-Kerma Rate series" | 148 |
| 10 | Considerazioni riassuntive sui risultati ottenuti | 153 |
| 11 | Conclusioni e prospettive | 162 |
| A | Distribuzioni degli spettri degli impulsi (PHD) | 163 |
| A.1 | Distanza sorgente-rivelatore = 50 cm. | 164 |
| A.1.1 | Serie L | 164 |
| A.1.2 | Serie N | 166 |
| A.1.3 | Serie H | 169 |
| A.2 | Distanza sorgente-rivelatore = 200 cm. | 171 |
| A.2.1 | Serie L | 171 |
| A.2.2 | Serie N | 173 |
| A.2.3 | Serie H | 176 |
| B | Spettri ricostruiti | 178 |
| B.1 | Distanza sorgente - rivelatore = 50 cm. | 179 |
| B.1.1 | Serie L | 179 |
| B.1.2 | Serie N | 187 |
| B.1.3 | Serie H | 204 |
| B.1.4 | Spettro 5 kV e 7,5 kV. | 215 |
| B.2 | Distanza sorgente - rivelatore = 200 cm. | 218 |
| B.2.1 | Serie L | 218 |
| B.2.2 | Serie N | 229 |
| B.2.3 | Serie H | 241 |

Elenco delle figure

| | | |
|------|--|----|
| 2.1 | Tubo a raggi X Seifert ISOVOLT 160 M2/0.4-1.5. | 7 |
| 2.2 | Andamento della potenza dissipata dall'anodo in funzione della tensione e corrente applicata al tubo a raggi X. | 9 |
| 2.3 | Dimensioni in mm del tubo. | 9 |
| 2.4 | Alloggiamento schermante del tubo a raggi X, sistema porta-filtri, camera a ionizzazione ad aria libera e banco ottico per il posizionamento della strumentazione di misura della radiazione ionizzante. | 10 |
| 2.5 | (a) Dettaglio dei punti di misura per la valutazione della radiazione diffusa dentro e fuori fascio e della penombra dovuta alla sorgente non puntiforme (disegno non in scala). (b) Dettaglio della penombra ottenuta dopo irraggiamento su lastra fotografica MIN-R Kodak 18 x 24 cm. | 13 |
| 2.6 | Verifica della proporzionalità dei valori dei ratei di esposizione assiali all'inverso del quadrato della distanza tra la superficie da irraggiare ed il fuoco in due diverse condizioni di misura. | 14 |
| 2.7 | Otturatore a tre stadi (tipo macchina fotografica). | 15 |
| 2.8 | Variazione percentuale (Δ) dell'intensità (I) del fascio di radiazione X rispetto all'intensità (I_0) ad 1.5 m nominale dalla sorgente sul banco ottico, in funzione della distanza radiale dal punto di riferimento. Tale variazione risulta inferiore a $\pm 0.5\%$ entro un diametro di 5 cm. | 16 |
| 2.9 | (a) Immagine della lastra irraggiata. (b) Variazione percentuale (Δ) dell'intensità (I) del fascio di radiazione X rispetto all'intensità (I_0) a 80 cm nominali dalla sorgente sul banco ottico, in funzione della distanza radiale dal punto di riferimento ottenuta con l'analizzatore di immagini IMAQ Visual Builder. Tale variazione risulta inferiore a $\pm 0,5\%$ entro un diametro di 5 cm. | 17 |
| 2.10 | Sistema porta-filtri. | 18 |
| 3.1 | Vista frontale dell'alloggiamento schermante del tubo a raggi X e della camera monitor per il controllo della stabilità del fascio di radiazioni. | 22 |
| 3.2 | Sezione longitudinale e trasversale della camera a ionizzazione ad aria libera, con particolare degli elettrodi (A) e (B), dell'elettrodo di raccolta (C) e dei materiali di cui è composta (misure in mm). | 23 |

| | | |
|------|--|----|
| 3.3 | Curva di saturazione della camera monitor. Ogni punto è il valore medio di tre misure. Gli errori sperimentali non sono apprezzabili sulla scala. u.a. = lettura camera monitor. | 26 |
| 3.4 | Curva di saturazione per la camera monitor della radiazione H20, H30 e H60, H100 della serie H. | 28 |
| 3.5 | Schema della camera monitor e particolare del volume di raccolta e degli elementi indispensabili al calcolo dello stesso con metodo analitico. | 29 |
| 3.6 | Camera cilindrica ad aria libera (SM1) impiegata come camera di riferimento per la misura di spessori emivalenti per ogni fascio di radiazione. | 30 |
| 3.7 | Curva di dipendenza dall'energia della camera cilindrica ad aria libera (SM1). | 33 |
| 3.8 | Curva di dipendenza dall'energia della camera monitor (FM1). | 33 |
| 4.1 | Condizioni sperimentali per la misura del SEV. | 37 |
| 5.1 | Spettro L10. | 45 |
| 5.2 | Spettro L20. | 46 |
| 5.3 | Spettro L30. | 47 |
| 5.4 | Spettro N10. | 48 |
| 5.5 | Spettro N15. | 49 |
| 5.6 | Spettro N20. | 50 |
| 5.7 | Spettro N25. | 51 |
| 5.8 | Spettro N30. | 52 |
| 5.9 | Spettro H20. | 53 |
| 5.10 | Spettro H30. | 54 |
| 5.11 | Andamento del coefficiente di conversione monoenergetico in aria $H_p(10; E)/k_a$ in Sv/Gy. | 58 |
| 6.1 | Rivelatore al Ge di tipo planare. | 60 |
| 6.2 | Diverse configurazioni geometriche di rivelatori al germanio. Intervalli di energia di impiego. | 62 |
| 6.3 | Vista del rivelatore al germanio e criostato. | 63 |
| 6.4 | Andamento dell'efficienza intrinseca di rivelazione per rivelatori di silicio e di germanio con la stessa geometria (piana, con spessore d=5 mm. | 64 |
| 6.5 | Sorgente tipo X.245 (dimensioni in mm). | 66 |
| 6.6 | Report della calibrazione in energia del sistema di acquisizione. | 67 |
| 6.7 | a) Calibrazione in energia - regressione lineare. b) Calibrazione in energia - regressione polinomiale. | 68 |
| 6.8 | a) Geometria assunta nella definizione dell'efficienza intrinseca. b) Geometria assunta nella definizione dell'efficienza assoluta. | 70 |
| 6.9 | a) Sezione del rivelatore ottenuta con MCNP 4C. b) Particolari degli strati morti considerati per i calcoli dell'efficienza di rivelazione. | 74 |

| | | |
|------|--|-----|
| 6.10 | Particolari della geometria del rivelatore e della sorgente impiegata per il calcolo della funzione risposta del sistema di rivelazione utilizzato. | 75 |
| 6.11 | Spaccati della geometria con particolare della finestra di berillio e della posizione del cristallo rispetto alla stessa. | 76 |
| 6.12 | Esempio delle traiettorie delle particelle all'ingresso del rivelatore. | 77 |
| 6.13 | Curve di efficienza simulate e sperimentali al variare dello spessore dello strato morto del rivelatore HPGe. | 78 |
| 6.14 | Rapporto tra l'efficienza di rivelazione simulata e misurata sperimentalmente per diversi spessori di dead layer. | 79 |
| 6.15 | Confronto tra i dati sperimentali e la curva ottenuta dalla simulazione per lo strato morto scelto. | 79 |
| 6.16 | Fascio N15 ottenuto applicando uno smoothing di media pesata. | 82 |
| 6.17 | Fascio N15 ottenuto applicando un filtro di Savitzky-Golay. | 83 |
| 7.1 | Schema dell'operazione eseguita per determinare il contributo Compton. Il contributo da attribuirsi al fenomeno della diffusione Compton è stato valutato canale per canale come rapporto tra i conteggi nel canale i -esimo ed il totale dei conteggi del picco di assorbimento totale (full-peak). | 88 |
| 7.2 | Frazione dei conteggi persi nel picco di assorbimento totale per la presenza dei picchi di fuga K. Confronto tra i dati ottenuti sperimentalmente con sorgenti radioattive sigillate (nero) e dati Monte Carlo (rosso). Curva di interpolazione esponenziale. | 91 |
| 7.3 | Curva di efficienza determinata dalla simulazione del rivelatore al germanio HPGe (i valori sono normalizzati alla riga dell' ^{241}Am a 59,54 keV). | 92 |
| 7.4 | Confronto tra gli spettri degli impulsi acquisiti e ottenuti dopo l'applicazione della matrice risposta agli spettri ricostruiti con la funzione di stripping | 94 |
| 7.5 | Confronto tra gli spettri degli impulsi acquisiti e ottenuti dopo l'applicazione della matrice risposta agli spettri ricostruiti con la funzione di stripping | 95 |
| 7.6 | La funzione risposta del rivelatore HPGe utilizzato. La matrice è suddivisa in zone: A) picchi di fuga K_α e K_β del germanio, B) picchi con energia pari alla differenza tra l'energia del picco di assorbimento totale e l'energia dei picchi di fuga e C) picchi di assorbimento totale. | 96 |
| 8.1 | Definizione di corrente (J) e fluenza (ϕ). | 100 |
| 8.2 | Coefficiente di trasferimento e assorbimento di energia massico dell'aria (scala log-log). | 102 |
| 8.3 | Coefficiente di assorbimento di energia massico dell'alluminio. | 103 |
| 8.4 | Rappresentazione schematica della geometria e della procedura impiegata per i calcoli dei coefficienti di conversione monenergetici. | 108 |
| 8.5 | Andamento del coefficiente di conversione $R(\Theta) = h(0,07; E, \alpha)/h(0,07; E, 0)$ in funzione dell'angolo α e dell'energia del fotone E | 112 |

| | | |
|------|--|-----|
| 8.6 | Coefficienti di conversione monoenergetici $h^*(10; E)$ in Sv/Gy in funzione dell'energia dei fotoni E. | 115 |
| 8.7 | Coefficienti di conversione monoenergetici $h'(0,07; E, \alpha^\circ)$ in funzione dell'energia del fotone E e dell'angolo di incidenza della radiazione. | 116 |
| A.1 | Spettro degli impulsi (PHD = Pulse High Distribution) dei fasci L10 (a) e L20 (b) della serie "Low air-kerma rate series" (L). Distanza sorgente-rivelatore = 50 cm. | 164 |
| A.2 | Spettro degli impulsi (PHD = Pulse High Distribution) dei fasci L30 (a) e L35 (b) della serie "Low air-kerma rate series" (L). Distanza sorgente-rivelatore = 50 cm. | 165 |
| A.3 | Spettro degli impulsi (PHD = Pulse High Distribution) dei fasci N10 (a) e N15 (b) della serie "Narrow-spectrum series" (N). Distanza sorgente-rivelatore = 50 cm. | 166 |
| A.4 | Spettro degli impulsi (PHD = Pulse High Distribution) dei fasci N20 (a) e N25 (b) della serie "Narrow-spectrum series" (N). Distanza sorgente-rivelatore = 50 cm. | 167 |
| A.5 | Spettro degli impulsi (PHD = Pulse High Distribution) dei fasci N30 (a) e N40 (b) della serie "Narrow-spectrum series" (N). Distanza sorgente-rivelatore = 50 cm. | 168 |
| A.6 | Spettro degli impulsi (PHD = Pulse High Distribution) dei fasci H10 (a) e H20 (b) della serie "High air-kerma rate series" (H). Distanza sorgente-rivelatore = 50 cm. | 169 |
| A.7 | Spettro degli impulsi (PHD = Pulse High Distribution) dei fasci H30 (a) e H60 (b) della serie "High air-kerma rate series" (H). Distanza sorgente-rivelatore = 50 cm. | 170 |
| A.8 | Spettro degli impulsi (PHD = Pulse High Distribution) dei fasci L10 (a) e L20 (b) della serie "Low air-kerma rate series" (L). Distanza sorgente-rivelatore = 200 cm. | 171 |
| A.9 | Spettro degli impulsi (PHD = Pulse High Distribution) dei fasci L30 (a) e L35 (b) della serie "Low air-kerma rate series" (L). Distanza sorgente-rivelatore = 200 cm. | 172 |
| A.10 | Spettro degli impulsi (PHD = Pulse High Distribution) dei fasci N10 (a) e N15 (b) della serie "Narrow-spectrum series" (N). Distanza sorgente-rivelatore = 200 cm. | 173 |
| A.11 | Spettro degli impulsi (PHD = Pulse High Distribution) dei fasci N20 (a) e N25 (b) della serie "Narrow-spectrum series" (N). Distanza sorgente-rivelatore = 200 cm. | 174 |
| A.12 | Spettro degli impulsi (PHD = Pulse High Distribution) dei fasci N30 e N40 della serie "Narrow-spectrum series" (N). Distanza sorgente-rivelatore = 200 cm. | 175 |
| A.13 | Spettro degli impulsi (PHD = Pulse High Distribution) dei fasci H10 (a) e H20 (b) della serie "High air-kerma rate series" (H). Distanza sorgente-rivelatore = 200 cm. | 176 |

| | | |
|------|--|-----|
| A.14 | Spettro degli impulsi (PHD = Pulse High Distribution) dei fasci H30 (a) e H60 (b) della serie "High air-kerma rate series" (H). Distanza sorgente-rivelatore = 200 cm. | 177 |
| B.1 | L10, distanza sorgente-rivelatore = 50 cm. | 179 |
| B.2 | L20, distanza sorgente rivelatore = 50 cm. | 180 |
| B.3 | L30, distanza sorgente-rivelatore = 50 cm. | 182 |
| B.4 | L35, distanza sorgente rivelatore = 50 cm. | 184 |
| B.5 | N10, distanza sorgente-rivelatore = 50 cm. | 187 |
| B.6 | N15, distanza sorgente-rivelatore = 50 cm. | 189 |
| B.7 | N20, distanza sorgente rivelatore = 50 cm. | 191 |
| B.8 | N25, distanza sorgente rivelatore = 50 cm. | 194 |
| B.9 | N30, distanza sorgente rivelatore = 50 cm. | 198 |
| B.10 | N40, distanza sorgente rivelatore = 50 cm. | 201 |
| B.11 | H10, distanza sorgente rivelatore = 50 cm. | 204 |
| B.12 | H20, distanza sorgente rivelatore = 50 cm. | 206 |
| B.13 | H30, distanza sorgente rivelatore = 50 cm. | 209 |
| B.14 | H60, distanza sorgente rivelatore = 50 cm. | 212 |
| B.15 | Spettro 5 kV, distanza sorgente-rivelatore = 50 cm. | 215 |
| B.16 | Spettro 7,5 kV, distanza sorgente-rivelatore = 50 cm. | 216 |
| B.17 | L20, distanza sorgente rivelatore = 200 cm. | 218 |
| B.18 | L20, distanza sorgente rivelatore = 200 cm. | 220 |
| B.19 | L30, distanza sorgente rivelatore = 200 cm. | 223 |
| B.20 | L35, distanza sorgente rivelatore = 200 cm. | 226 |
| B.21 | N10, distanza sorgente rivelatore = 200 cm. | 229 |
| B.22 | N15, distanza sorgente rivelatore = 200 cm. | 231 |
| B.23 | N20, distanza sorgente rivelatore = 200 cm. | 232 |
| B.24 | N25, distanza sorgente rivelatore = 200 cm. | 235 |
| B.25 | N30, distanza sorgente rivelatore = 200 cm. | 237 |
| B.26 | N40, distanza sorgente rivelatore = 200 cm. | 239 |
| B.27 | H10, distanza sorgente rivelatore = 200 cm. | 241 |
| B.28 | H20, distanza sorgente rivelatore = 200 cm. | 243 |
| B.29 | H30, distanza sorgente rivelatore = 200 cm. | 245 |
| B.30 | H60, distanza sorgente rivelatore = 200 cm. | 248 |

Elenco delle tabelle

| | | |
|-----|--|----|
| 2.1 | Principali caratteristiche del tubo a raggi X Seifert ISOVOLT 160 M2/0.4-1.5. | 8 |
| 2.2 | Valori di esposizione della radiazione diffusa lungo l'asse del fascio (a) e all'esterno del fascio(2·raggio + penombra) di radiazione X (b). | 12 |
| 2.3 | Proprietà dei metalli. | 17 |
| 3.1 | Principali caratteristiche costruttive della camera a ionizzazione ad aria libera per campi di radiazioni X di bassa energia. | 25 |
| 3.2 | Fattore di taratura della camera cilindrica ad aria libera (FT_{SM1}) in funzione dell'energia dei fasci di radiazione studiati. | 31 |
| 3.3 | Fattore di taratura della camera monitor (FT_{FM1}) in funzione dell'energia dei fasci di radiazione studiati. | 32 |
| 4.1 | Caratteristiche delle radiazioni di riferimento. | 36 |
| 4.2 | Caratteristiche dei filtri impiegati per la misure di I° e II° SEV. | 37 |
| 4.3 | Tensioni e filtrazioni aggiuntive determinate sperimentalmente da impostare per i fasci caratterizzati. | 38 |
| 4.4 | Riassunto delle caratteristiche dei fasci caratterizzati mediante il metodo classico degli spessori emivalenti (metodo dosimetrico). | 40 |
| 4.5 | Misure di riferimento in (mGy/nC) sia per la taratura delle camere a ionizzazione (40 cm) sia per la taratura dei dosimetri (2 m).I fasci che nella prima tabella sono stati evidenziati sono quelli per cui è stato necessario impiegare una diversa camera a ionizzazione nelle misure di riferimento. | 41 |
| 5.1 | Fantocci di riferimento secondo le raccomandazioni ISO. | 56 |
| 6.1 | Caratteristiche generali del rivelatore al Germanio. | 61 |
| 6.2 | Principali caratteristiche delle sorgenti di raggi gamma impiegate nella calibrazione del sistema di rivelazione. | 65 |
| 6.3 | Verifica sperimentale dell'efficienza del rivelatore per diverse energie. | 71 |
| 7.1 | Righe di fluorescenza caratteristiche del germanio. | 85 |
| 7.2 | ROI delle sorgenti impiegate per la valutazione dei conteggi persi per i picchi K del germanio. | 89 |

| | | |
|-----|--|-----|
| 7.3 | Valutazione percentuale della frazione di conteggi persi per i picchi di fuga K del germanio. | 90 |
| 8.1 | Dati caratteristici della serie "Low Air-Kerma Rate series" (L): energia media (E_{media}), energia massima (E_{max}), primo e secondo spessore emivalente (I° e II° SEV), fattore di kerma ($k(R)$). (a) Distanza sorgente - punto di misura = 50 cm. (b) Distanza sorgente - punto di misura = 200 cm. | 104 |
| 8.2 | Dati caratteristici della serie "Narrow-Spectrum" (N): energia media (E_{media}), energia massima (E_{max}), primo e secondo spessore emivalente (I° e II° SEV), fattore di kerma ($k(R)$). (a) Distanza sorgente - punto di misura = 50 cm. (b) Distanza sorgente - punto di misura = 200 cm. | 105 |
| 8.3 | Dati caratteristici della serie "High Air-Kerma Rate" (H): energia media (E_{media}), energia massima (E_{max}), primo e secondo spessore emivalente (I° e II° SEV), fattore di kerma ($k(R)$). (a) Distanza sorgente - punto di misura = 50 cm. (b) Distanza sorgente - punto di misura = 200 cm. | 106 |
| 8.4 | Coefficienti di conversione $h(10; E, \alpha^\circ)$ in Sv/Gy per diversi angoli di incidenza | 109 |
| 8.5 | Coefficienti di conversione $h(0,07; E, \alpha^\circ)$ in Sv/Gy per diversi angoli di incidenza | 111 |
| 8.6 | Coefficienti di conversione $h(3; E, \alpha^\circ)$ in Sv/Gy per diversi angoli di incidenza | 114 |
| 8.7 | Coefficienti di conversione monoenergetici $h^*(10; E)$ in Sv/Gy. . . | 115 |
| 8.8 | Variazione percentuale dei dati caratteristici primo e secondo spessore emivalente (I° e II° SEV), energia media (E_{media}), fattore di kerma ($k(R)$) e coefficienti di conversione $h(0,07; R)$, $h^*(10; R)$, $h(10; R, 0)$ e $h(0,07; R, 0)$ per una variazione della tensione del tubo a raggi X del $\pm 1\%$ | 118 |
| 8.9 | Variazione percentuale dei dati caratteristici primo e secondo spessore emivalente (I° e II° SEV), energia media (E_{media}), fattore di kerma ($k(R)$) e coefficienti di conversione $h(0,07; R)$, $h^*(10; R)$, $h(10; R, 0)$ e $h(0,07; R, 0)$ per una variazione della densità dell'aria del $\pm 10\%$ | 120 |
| 9.1 | Caratteristiche delle radiazioni di riferimento della serie "Low Air-Kerma Rate series" (L) misurate sperimentalmente con un rivelatore al Germanio (metodo spettrometrico) specificate nella ISO 4037-1 [1]: energia media, E_{media} ed energia massima, E_{max} dello spettro in keV, coefficiente di omogeneità ($h = ISEV/IISEV$), risoluzione in %, fattore di kerma $k(R)$ in $pGy \cdot cm^2$. Coefficiente di conversione da kerma in aria, K_a , all'equivalente di dose ambientale, $H^*(10)$, per la sfera ICRU. Distanza sorgente-rivelatore (SDD) = 50. cm | 123 |

| | | |
|------|---|-----|
| 9.2 | Coefficienti di conversione $h(10; L, \alpha^\circ)$ in Sv/Gy da kerma in aria, K_a , all'equivalente di dose personale, $H_p(10)$, per il fantoccio a slab e per le qualità della radiazione della serie "Low Air-Kerma Rate series" come specificato nella ISO 4037-1 [1]; distanza sorgente-rivelatore = 50 cm. | 124 |
| 9.3 | Coefficienti di conversione $h(0,07; L, \alpha^\circ)$ in Sv/Gy da kerma in aria, K_a , all'equivalente di dose personale, $H_p(0,07)$, per la pelle e per le qualità della radiazione della serie "Low Air-Kerma Rate series" come specificato nella ISO 4037-1 [1]; distanza sorgente-rivelatore = 50 cm. | 125 |
| 9.4 | Coefficiente di conversione $h(3; L, \alpha)$ in Sv/Gy da kerma in aria, K_a , all'equivalente di dose personale, $H_p(3)$, per il cristallino e per le qualità della radiazione della serie "Low Air-Kerma Rate series" [15]. | 126 |
| 9.5 | Coefficienti di conversione $h'(0,07; L, \alpha^\circ)$ in Sv/Gy da kerma in aria, K_a , all'equivalente di dose direzionale, $H'(0,07, \Omega)$, per la sfera ICRU e per le qualità della radiazione della serie "Low Air-Kerma Rate series" come specificato nella ISO 4037-1 [1]; distanza sorgente-rivelatore = 50 cm. | 127 |
| 9.6 | Caratteristiche delle radiazioni di riferimento della serie "Narrow-Spectrum series" (N) misurate sperimentalmente con un rivelatore al Germanio (metodo spettrometrico) specificate nella ISO 4037-1 [1]: energia media, E_{media} ed energia massima, E_{max} dello spettro in keV, coefficiente di omogeneità ($h = ISEV/IISEV$), risoluzione in %, fattore di kerma $k(R)$ in $pGy \cdot cm^2$. Coefficiente di conversione da kerma in aria, K_a , all'equivalente di dose ambientale, $H^*(10)$, per la sfera ICRU. Distanza sorgente-rivelatore (SDD) = 50. cm | 128 |
| 9.7 | Coefficienti di conversione $h(10; N, \alpha^\circ)$ in Sv/Gy da kerma in aria, K_a , all'equivalente di dose personale, $H_p(10)$, per il fantoccio a slab e per le qualità della radiazione della serie "Narrow-Spectrum series" (N) come specificato nella ISO 4037-1 [1]; distanza sorgente-rivelatore = 50 cm. | 129 |
| 9.8 | Coefficienti di conversione $h(0,07; N, \alpha^\circ)$ in Sv/Gy da kerma in aria, K_a , all'equivalente di dose personale, $H_p(0,07)$, per la pelle e per le qualità della radiazione della serie "Narrow-Spectrum series" (N) come specificato nella ISO 4037-1 [1]; distanza sorgente-rivelatore = 50 cm. | 130 |
| 9.9 | Coefficiente di conversione $h(3; N, \alpha)$ in Sv/Gy da kerma in aria, K_a , all'equivalente di dose personale, $H_p(3)$, per il cristallino e per le qualità della radiazione della serie "Narrow-Spectrum series" [15]. | 131 |
| 9.10 | Coefficienti di conversione $h'(0,07; N, \alpha^\circ)$ in Sv/Gy da kerma in aria, K_a , all'equivalente di dose direzionale, $H'(0,07, \Omega)$, per la sfera ICRU e per le qualità della radiazione della serie "Narrow-Spectrum series" (N) come specificato nella ISO 4037-1 [1]; distanza sorgente-rivelatore = 50 cm. | 132 |

- 9.11 Caratteristiche delle radiazioni di riferimento della serie “High Air-Kerma Rate series” (H) misurate sperimentalmente con un rivelatore al Germanio (metodo spettrometrico) specificate nella ISO 4037-1 [1]: energia media E_{media} ed energia massima E_{max} dello spettro in keV, coefficiente di omogeneità ($h = ISEV/IISEV$), risoluzione in %, fattore di kerma $k(R)$ in $pGy \cdot cm^2$. Coefficiente di conversione da kerma in aria, K_a , all’equivalente di dose ambientale, $H^*(10)$, per la sfera ICRU. Distanza sorgente-rivelatore (SDD) = 50. cm 133
- 9.12 Coefficienti di conversione $h(10; H, \alpha^\circ)$ in Sv/Gy da kerma in aria, K_a , all’equivalente di dose personale, $H_p(10)$, per il fantoccio a slab e per le qualità della radiazione della serie “High Air-Kerma Rate series” (H) come specificato nella ISO 4037-1 [1]; distanza sorgente-rivelatore = 50 cm. 134
- 9.13 Coefficienti di conversione $h(0,07; H, \alpha^\circ)$ in Sv/Gy da kerma in aria, K_a , all’equivalente di dose personale, $H_p(0,07)$, per la pelle e per le qualità della radiazione della serie “High Air-Kerma Rate series” (H) come specificato nella ISO 4037-1 [1]; distanza sorgente-rivelatore = 50 cm. 135
- 9.14 Coefficiente di conversione $h(3; H, \alpha)$ in Sv/Gy da kerma in aria, K_a , all’equivalente di dose personale, $H_p(3)$, per il cristallino e per le qualità della radiazione della serie High Air-Kerma Rate series” (H) [15]. 136
- 9.15 Coefficienti di conversione $h'(0,07; H, \alpha^\circ)$ in Sv/Gy da kerma in aria, K_a , all’equivalente di dose direzionale, $H'(0,07, \Omega)$, per la sfera ICRU e per le qualità della radiazione della serie “High Air-Kerma Rate series” (H) come specificato nella ISO 4037-1 [1]; distanza sorgente-rivelatore = 50 cm. 137
- 9.16 Caratteristiche delle radiazioni di riferimento della serie “Low Air-Kerma Rate series” (L) misurate sperimentalmente con un rivelatore al Germanio (metodo spettrometrico) specificate nella ISO 4037-1 [1]: energia media E_{media} ed energia massima E_{max} dello spettro in keV, coefficiente di omogeneità ($h = ISEV/IISEV$), risoluzione in %, fattore di kerma $k(R)$ in $pGy \cdot cm^2$. Coefficiente di conversione da kerma in aria, K_a , all’equivalente di dose ambientale, $H^*(10)$, per la sfera ICRU. Distanza sorgente-rivelatore (SDD) = 200. cm 138
- 9.17 Coefficienti di conversione $h(10; L, \alpha^\circ)$ in Sv/Gy da kerma in aria, K_a , all’equivalente di dose personale, $H_p(10)$, per il fantoccio a slab e per le qualità della radiazione della serie “Low Air-Kerma Rate series” (L) come specificato nella ISO 4037-1 [1]. Distanza sorgente-rivelatore = 200 cm. 139
- 9.18 Coefficienti di conversione $h(0,07; L, \alpha^\circ)$ in Sv/Gy da kerma in aria, K_a , all’equivalente di dose personale, $H_p(0,07)$, per la pelle e per le qualità della radiazione della serie “Low Air-Kerma Rate series” (L) come specificato nella ISO 4037-1 [1]; distanza sorgente-rivelatore = 200 cm. 140

| | | |
|------|--|-----|
| 9.19 | Coefficiente di conversione $h(3; L, \alpha)$ in Sv/Gy da kerma in aria, K_a , all'equivalente di dose personale, $H_p(3; L, \alpha)$, per il cristallino e per le qualità della radiazione della serie "Low Air-Kerma Rate series" [15]. | 141 |
| 9.20 | Coefficienti di conversione $h'(0, 07; L, \alpha^\circ)$ in Sv/Gy da kerma in aria, K_a , all'equivalente di dose direzionale, $H'(0, 07, \Omega)$, per la sfera ICRU e per le qualità della radiazione della serie "Low Air-Kerma Rate series" (L) come specificato nella ISO 4037-1 [1]; distanza sorgente-rivelatore = 200 cm. | 142 |
| 9.21 | Caratteristiche delle radiazioni di riferimento della serie "Narrow-Spectrum series" (N) misurate sperimentalmente con un rivelatore al Germanio (metodo spettrometrico) specificate nella ISO 4037-1 [1]: energia media E_{media} ed energia massima E_{max} dello spettro in keV, coefficiente di omogeneità ($h = ISEV/IISEV$), risoluzione in %, fattore di kerma $k(R)$ in $pGy \cdot cm^2$. Coefficiente di conversione da kerma in aria, K_a , all'equivalente di dose ambientale, $H^*(10)$, per la sfera ICRU. Distanza sorgente-rivelatore (SDD) = 200. cm | 143 |
| 9.22 | Coefficienti di conversione $h(10; N, \alpha^\circ)$ in Sv/Gy da kerma in aria, K_a , all'equivalente di dose personale, $H_p(10)$, per il fantoccio a slab e per le qualità della radiazione della serie "Narrow-Spectrum series" (N) come specificato nella ISO 4037-1 [1]; distanza sorgente-rivelatore = 200 cm. | 144 |
| 9.23 | Coefficienti di conversione $h(0, 07; N, \alpha^\circ)$ in Sv/Gy da kerma in aria, K_a , all'equivalente di dose personale, $H_p(0, 07)$, per la pelle e per le qualità della radiazione della serie "Narrow-Spectrum series" (N) come specificato nella ISO 4037-1 [1]; distanza sorgente-rivelatore = 200 cm. | 145 |
| 9.24 | Coefficiente di conversione $h(3; N, \alpha)$ in Sv/Gy da kerma in aria, K_a , all'equivalente di dose personale, $H_p(3)$, per il cristallino e per le qualità della radiazione della serie "Narrow-Spectrum series" (N) [15]. | 146 |
| 9.25 | Coefficienti di conversione $h'(0, 07; R, \alpha^\circ)$ in Sv/Gy da kerma in aria, K_a , all'equivalente di dose direzionale, $H'(0, 07, \Omega)$, per la sfera ICRU e per le qualità della radiazione della serie "Narrow-Spectrum series" (N) come specificato nella ISO 4037-1 [1]; distanza sorgente-rivelatore = 200 cm. | 147 |
| 9.26 | Caratteristiche delle radiazioni di riferimento della serie "High Air-Kerma Rate series" (H) misurate sperimentalmente con un rivelatore al Germanio (metodo spettrometrico) specificate nella ISO 4037-1 [1]: energia media E_{media} ed energia massima E_{max} dello spettro in keV, coefficiente di omogeneità ($h = ISEV/IISEV$), risoluzione in %, fattore di kerma $k(R)$ in $pGy \cdot cm^2$. Coefficiente di conversione da kerma in aria, K_a , all'equivalente di dose ambientale, $H^*(10)$, per la sfera ICRU. Distanza sorgente-rivelatore (SDD) = 200. cm | 148 |

| | | |
|------|---|-----|
| 9.27 | Coefficienti di conversione $h(10; H, \alpha^\circ)$ in Sv/Gy da kerma in aria, K_a , all'equivalente di dose personale, $H_p(10)$, per il fantoccio a slab e per le qualità della radiazione della serie "High Air-Kerma Rate series" (H) come specificato nella ISO 4037-1 [1]; distanza sorgente-rivelatore = 200 cm. | 149 |
| 9.28 | Coefficienti di conversione $h(0,07; H, \alpha^\circ)$ in Sv/Gy da kerma in aria, K_a , all'equivalente di dose personale, $H_p(0,07)$, per la pelle e per le qualità della radiazione della serie "High Air-Kerma Rate series" (H) come specificato nella ISO 4037-1 [1]; distanza sorgente-rivelatore = 200 cm. | 150 |
| 9.29 | Coefficiente di conversione $h(3; H, \alpha)$ in Sv/Gy da kerma in aria, K_a , all'equivalente di dose personale, $H_p(3)$, per il cristallino e per le qualità della radiazione della serie "High Air-Kerma Rate series" (H) [15]. | 151 |
| 9.30 | Coefficienti di conversione $h'(0,07; H, \alpha^\circ)$ in Sv/Gy da kerma in aria, K_a , all'equivalente di dose direzionale, $H'(0,07, \Omega)$, per la sfera ICRU e per le qualità della radiazione della serie "High Air-Kerma Rate series" (H) come specificato nella ISO 4037-1 [1]; distanza sorgente-rivelatore = 200 cm. | 152 |
| 10.1 | Confronto tra i valori di spessore emivalente ottenuti dalla misura con camera a ionizzazione e calcolati dagli spettri ricostruiti. . . . | 155 |
| 10.2 | Differenza percentuale tra primo e secondo spessore emivalente ottenuto dalla misura diretta con camera a ionizzazione e dal calcolo sullo spettro ricostruito. | 156 |
| 10.3 | Energia media (E_m) e risoluzione spettrale (R_E) per i fasci X filtrati utilizzati nel Centro di Metrologia ENEA. | 157 |
| 10.4 | Confronto dei coefficienti di conversione da kerma in aria alle grandezze $H_p(10)$, $H_p(0,07)$, $H'(0,07)$, $H^*(10)$. I valori confrontati sono quelli ottenuti ad una distanza sorgente - punto di misura pari a 200 cm. | 158 |

Capitolo 1

Introduzione

1.1 Stato dell'arte della metrologia delle radiazioni di bassa energia

La ricerca in radioprotezione ha principalmente lo scopo di sviluppare tecniche di rivelazione e dosimetria delle radiazioni ionizzanti in attuazione di raccomandazioni internazionali (International Commission in Radiological Protection) e, tenendo conto dell'evoluzione tecnologica, anche nel campo della produzione artificiale di radiazioni: come, per esempio, il sempre maggiore utilizzo delle radiazioni per scopi sanitari e di tecniche diagnostiche su materiali. Ciò comporta spesso il ricorso ad un sistema integrato di conoscenze: matematico-numerico per simulazioni modellistiche insieme a tecniche sperimentali più o meno prototipali.

Le attuali linee di attività dell'Istituto di Radioprotezione dell'ENEA di Bologna (ENEA-IRP), presso cui è stata svolta l'attività di ricerca, sono infatti sia sperimentali sia modellistiche, mediante l'utilizzo di metodi computazionali Monte Carlo (MCNP-4C) per rispondere ad esigenze specifiche di radioprotezione operativa per impianti e laboratori, alla qualificazione ed al miglioramento delle tecniche dosimetriche per il monitoraggio della esposizione esterna ed interna ed al mantenimento e all'ampliamento degli standard di misura per la taratura della strumentazione. Le suddette attività sono svolte anche in collegamento con gli altri paesi europei mediante collaborazioni ed azioni di interconfronto.

In particolare, il programma di ricerca svolto ha riguardato la qualificazione metrologica dei campi di radiazioni X di bassa energia (≤ 30 keV) con particolare attenzione all'impiego di tecniche di rivelazione innovative e strumenti di misura di ultima generazione. L'attività sperimentale è stata effettuata presso il laboratorio secondario di metrologia delle radiazioni ionizzanti. Il Centro di Taratura dell'ENEA di Bologna opera nel campo della metrologia secondaria da quasi quaranta anni ed è stato il primo Centro nel 1985 ad essere riconosciuto dal SIT (Servizio di Taratura in Italia) per tutte le grandezze dosimetriche. Attualmente svolge attività di calibrazione operando con riferibilità metrologica ai campioni primari nazionali per le radiazioni X, gamma, beta e neutroni.

La caratterizzazione di un tubo a raggi X di bassa energia ha permesso quindi al Centro di Taratura di estendere la disponibilità di sorgenti di riferimento fino

a 5 keV, tipicamente associati ad applicazioni di ricerca (luce di sincrotrone, linea di luce di cristallografia e SAXS-Diffrazione di raggi X a piccolo angolo tecniche che consentono di analizzare la struttura geometrica di materiali su scala microscopica) e di medicina (mammografia, radioterapie superficiali). Le applicazioni dei raggi X sono ormai molto diffuse oltre che per applicazione alla radiologia medica anche per modalità d'indagine sulle proprietà microscopiche dei materiali, estendendo al livello atomico la capacità di analizzare gli oggetti.

In questa più bassa regione energetica la qualificazione metrologica dei fasci X (in particolar modo la determinazione sperimentale dei coefficienti di conversione da kerma in aria alle grandezze operazionali, $H_p(d)$, $H^*(10)$ e $H'(0,07)$), richiede necessariamente anche l'uso di analisi spettrometriche, in quanto la sola determinazione degli spessori emivalenti (metodo dosimetrico) non assicura il controllo ed una accurata determinazione di tutte le componenti spettrali.

Il risultato di una misura spettrometrica è dato dalla distribuzione dello spettro degli impulsi. Per ottenere il reale spettro incidente sul rivelatore è necessario definire ed applicare precise procedure di deconvoluzione dello spettro per tenere conto delle perturbazioni prodotte dal rivelatore. Ogni spettro è stato misurato mediante un rivelatore al germanio iperpuro (HPGe) e grazie all'allestimento di una particolare catena spettrometrica e disposizione sperimentale. Al fine di ottenere, quindi, la reale distribuzione dei fotoni incidenti sul rivelatore è stata definita una procedura iterativa di ricostruzione che tiene conto di tutte le caratteristiche della catena spettrometrica utilizzata e delle reali condizioni di misura (procedura di stripping). Tale procedura è stata validata mediante il confronto con i dati spettrali (I° e II° spessore emivalente, SEV) ottenuti con il metodo dosimetrico e basandosi sulla conoscenza della funzione risposta del rivelatore calcolata con il metodo Monte Carlo.

Ogni qualità di radiazione è stata caratterizzata in termini di primo e secondo spessore emivalente, energia media, energia massima, coefficienti di conversione da kerma in aria alle grandezze operazionali usando gli spettri precedentemente ricostruiti. Ogni parametro caratteristico è stato normalizzato alle condizioni di riferimento in quanto a temperatura, pressione e umidità (densità dell'aria).

Mediante questo lavoro è stato verificato che, laddove i coefficienti di conversione presentano una forte dipendenza dall'energia e cioè per le basse energie, come nel caso dei coefficienti di conversione $H_p(d)/k_a$ e $H^*(d)/k_a$ è molto importante conoscere la distribuzione spettrale propria dell'impianto usato per la determinazione degli stessi. Questa considerazione è sostenuta da dati di letteratura, in cui vengono riportati valori di coefficienti di conversione che differiscono di circa il 90% rispetto a quanto riportato sulla normativa di riferimento.

Tali considerazioni hanno fatto nascere l'esigenza, come Centro di Taratura, di caratterizzare i fasci nel campo delle basse energie prodotti da un proprio impianto. Sono state misurate tutte le distribuzioni spettrali con tensioni inferiori a 30 kV indicate dalla normativa ISO 4037-4. Lo studio è stato esteso, inoltre, a fasci di energia superiore, L35, N40 e H60 (dando la possibilità di confronti con gli stessi fasci prodotti da impianti diversi e precedentemente caratterizzati) e due fasci non ancora standardizzati rispettivamente di 5 kV e 7,5 kV, in modo da permettere interconfronti con altri Laboratori di metrologia che a loro volta si sono spinti ad energie X di questa entità. Ogni spettro è stato misurato a

50 cm e 200 cm dalla sorgente di radiazione: rispettivamente punto utile per la taratura con strumentazione di radioprotezione e per irraggiamenti di dosimetri su specifici fantocci. La necessità di misurare ogni spettro anche a 200 cm dalla sorgente di radiazione è dovuto alla calibrazione in termini di $H_p(10)$. I dosimetri sono infatti irraggiati su di un fantoccio a slab (30 cm x 30 cm x 15 cm), perciò per irraggiare in modo omogeneo l'intera superficie del fantoccio è stato necessario impostare una distanza tra fuoco e punto di misura pari a 200 cm.

Grazie a questo lavoro ENEA-IRP costituisce al momento il primo Centro di Taratura in Italia che dispone di una serie di fasci interamente caratterizzati nel campo delle basse energie.

1.2 Obiettivo della tesi

L'attività di ricerca, si inserisce, in particolare, nel settore della qualificazione e sviluppo degli standard di misura per la dosimetria, rispondendo a nuove esigenze operative e di accreditamento del centro SIT relativamente alla messa a punto di campi X di riferimento per la taratura di dosimetri personali e strumentazione di radioprotezione. Lo scopo del lavoro consiste nella qualificazione metrologica dei campi di radiazioni di bassa energia (5-30 kV). In questa più bassa regione energetica la qualificazione metrologica dei fasci X richiede necessariamente anche l'uso di analisi spettrometriche, in quanto la sola determinazione degli spessori emivalenti non assicura il controllo e la corrispondenza di tutte le componenti spettrali.

Il lavoro terminato permetterà di poter disporre di fasci X delle più basse energie per collaborazioni in altri campi di ricerca e di una catena spettrometrica qualificata per diversi impieghi e necessità in radioprotezione. Sono stati valutati i seguenti obiettivi:

- Allestimento e collaudo dell'impianto radiologico come sorgente standardizzata [3].
- Caratterizzazione e taratura della camera di controllo ad aria libera ([52]-[56]).
- Realizzazione ed accreditamento dei fasci X filtrati in base alle raccomandazioni ISO 4037-1 [1] mediante il metodo degli spessori emivalenti (metodo dosimetrico).
- Taratura dei campioni di misura presso l'Istituto Nazionale di Metrologia delle Radiazioni Ionizzanti (INMRI-ENEA).
- Taratura della camera di controllo (monitor) anche come campione operativo per la taratura della strumentazione di radioprotezione e dei dosimetri personali.
- Analisi della variazione degli spettri fotonici di bassa energia dalla distanza sorgente-rivelatore (assorbimento dell'aria) in riferimento alle grandezze radioprotezionistiche.

- Determinazione, mediante codice MCNP-4C, dei coefficienti di conversione monoenergetici da kerma in aria ad equivalente di dose personale $H_p(10, \alpha^\circ)$, $H_p(3, \alpha^\circ)$ e $H_p(0,07, \alpha^\circ)$ per energie inferiori a 10 keV, non tabulati sull'ICRU Report 57 [2].
- Definizione di un metodo per l'acquisizione degli spettri di raggi X sperimentali nel campo delle basse energie, realizzazione di collimatori puntiformi (*pin-hole*) associati a distanze sorgenti-bersaglio al fine di ridurre la fluenza fotonica.
- Qualificazione della catena spettrometrica, caratterizzazione del rivelatore al Germanio iperpuro (HPGe) con sorgenti radioisotopiche.
- Determinazione sperimentale della curva di efficienza al variare dell'energia e simulazioni Monte Carlo MCNP-4C per la validazione di una funzione continua da utilizzare nella spettrometria dei fasci X.
- Definizione della matrice risposta contenente tutte le informazioni del processo di rivelazione.
- Analisi delle diverse tecniche matematiche per la deconvoluzione degli spettri.
- Verifica dei parametri caratteristici degli spettri per basse energie analizzati nella fase di caratterizzazione dell'impianto impiegando il metodo dosimetrico degli spessori emivalenti e mediante spettrometria X.

1.3 Struttura della tesi

Il presente lavoro di tesi è suddiviso in capitoli, di seguito brevemente descritti:

Il secondo capitolo contiene una descrizione dell'impianto radiologico Seifert ISOVOLT MXR 160/0.4-1.5 e dell'attrezzatura necessaria per la realizzazione di fasci di riferimento X. Allestimento e collaudo dell'impianto che consiste nella centratura e caratterizzazione del fascio mediante l'impiego di camere a ionizzazione e lastre fotografiche.

Nel capitolo tre sono descritte in dettaglio le caratteristiche costruttive della camera a ionizzazione ad aria libera (camera monitor), progettata e realizzata nell'ambito delle attività di metrologia dell'Istituto di Radioprotezione dell'E-NEA di Bologna, impiegata nel controllo delle fluttuazioni del fascio di fotoni prodotti dal tubo a raggi X di bassa energia. Sono riportati, inoltre, i risultati delle misure effettuate per determinare le caratteristiche dello strumento costruito.

Il capitolo quattro contiene le procedure impiegate nella realizzazione ed accreditamento dei fasci X filtrati di bassa energia in accordo con le raccomandazioni ISO 4037 mediante il metodo dosimetrico.

Nel capitolo cinque vengono descritte le caratteristiche nominali dei campi di irraggiamento e le grandezze dosimetriche associate; particolare attenzione è stata data all'analisi della dipendenza degli spettri fotonici di bassa energia dalla distanza sorgente-rivelatore.

La determinazione, mediante codice MCNP-4C, dei coefficienti di conversione da kerma in aria ad equivalente di dose personale $H_p(10, \alpha^\circ)$, $H_p(3, \alpha^\circ)$ e $H_p(0,07, \alpha^\circ)$ per energie inferiori a 10 keV, non tabulati sull'ICRU Report 57 [2].

Il capitolo sei contiene una descrizione dettagliata della catena spettrometrica e dei suoi componenti, il procedimento sperimentale impiegato per l'acquisizione della distribuzione degli impulsi con un rivelatore al germanio iperpuro (HPGe) di tipo Ultra LEGE (Ultra Low Energy GERmanium) completo di pre-amplificatore e di un elaboratore digitale di segnali (Digital Signal Processor, DSP). Contiene, inoltre, la calibrazione del sistema di rivelazione, includendo la calibrazione in energia ed in efficienza.

Nel capitolo sette è spiegato in modo dettagliato il metodo sviluppato per la ricostruzione degli spettri dei fasci X filtrati nel dominio energetico di interesse e la sua validazione mediante l'applicazione della funzione risposta del rivelatore ottenuta con codice Monte Carlo (MCNP-4C).

Nel capitolo otto viene descritto il metodo usato per la determinazione dei dati caratteristici di ogni spettro ricostruito in modo particolare dei coefficienti di conversione da kerma in aria alle grandezze operative.

Nel capitolo nove sono riportati in tabelle i valori ottenuti dei coefficienti di conversione in funzione dell'angolo per ogni fascio X filtrato.

Il capitolo dieci è dedicato a confronti dei risultati ottenuti con quanto riportato dalla normativa ISO 4037-3 di riferimento e da altri laboratori europei.

Le conclusioni e le prospettive future sono riportate nel capitolo undici.

In appendice A sono riportate tutte le distribuzioni degli impulsi acquisite mentre in appendice B sono riportati tutti gli spettri ricostruiti (in conteggi).

Capitolo 2

L'impianto radiologico: tubo a raggi X SEIFERT ISOVOLT M2 160/0.4-1.5

2.1 Introduzione

Il seguente capitolo contiene una descrizione dettagliata dell'impianto radiologico Seifert ISOVOLT M2 160/0.4-1.5 e del suo allestimento e collaudo.

Il sistema di misura è stato interamente progettato e collaudato presso il Centro di Taratura dell'ENEA di Bologna per tutte le applicazioni nel campo della metrologia e dosimetria dei fasci di radiazione X filtrati, in particolare per il suo impiego per le radiazioni ionizzanti di bassa energia.

L'impianto è il risultato di un incontro fra l'esperienza più che ventennale dell'Istituto di Radioprotezione come Centro di Taratura SIT e le capacità realizzative della Ditta ITECO ENGINEERING che opera dal 1987 in questo settore.

L'obiettivo è stato quello di realizzare un oggetto completo che permettesse di eseguire tutte le procedure operative, in ottemperanza ai migliori standard di misura nazionali ed internazionali, per le operazioni di taratura sia dei dosimetri personali sia della strumentazione di radioprotezione.

Gli strumenti di cui è possibile la taratura sono le camere a ionizzazione normali ed in pressione, i Geiger-Muller, gli scintillatori ed i contatori proporzionali ed i rivelatori a semiconduttore.

Il sistema è inoltre progettato ed ottimizzato per eseguire irraggiamenti frontali ed angolari sia in aria sia per i dosimetri personali anche su specifici fantocci.

2.2 Radiazione X: descrizione dell'impianto radiologico

Per sorgenti di radiazioni fotoniche è necessario fare una distinzione fra macchina radiogena ed attrezzature di supporto (filtrazione aggiuntiva, gruppo otturatore, pareti schermanti). A determinare l'idoneità del sistema al suo utilizzo per ra-



Figura 2.1: *Tubo a raggi X Seifert ISOVOLT 160 M2/0.4-1.5.*

diazioni di riferimento in determinati intervalli energetici sono le caratteristiche del tubo a raggi X, in modo particolare nel dominio energetico di interesse.

Le caratteristiche dell'impianto a raggi X devono essere tali da garantire innanzitutto una elevata stabilità della fluenza energetica dei fasci a raggi X da esso generati. In particolare è richiesto un elevato grado di stabilità dell'alta tensione dell'impianto a raggi X, in quanto l'energia media del fascio di radiazione X è proporzionale a circa il quadrato della tensione applicata [3].

La normativa tecnica ISO 4037 [1] richiede che un tubo a raggi X per potere essere impiegato in campo metrologico per radiazioni X di bassa energia debba possedere determinate caratteristiche: una finestra di uscita sottile e realizzata in materiale a basso numero atomico in modo da assicurare un valore molto basso della filtrazione inerente ed una stabilità dell'alta tensione inferiore a $\pm 1\%$, per garantire la riproducibilità spettrale dei fasci di radiazione.

Il sistema di collimazione del fascio di radiazione X deve essere tale da garantire sul piano di irraggiamento una omogeneità del fascio inferiore all'1% (condizioni che si sono verificate nel nostro caso ad una distanza sorgente-piano di riferimento pari a 40 cm con un campo di radiazione avente un diametro di circa 8 cm). In campo metrologico un aspetto di fondamentale importanza riguarda appunto l'omogeneità del fascio di radiazione.

Il sistema impiegato presenta caratteristiche conformi a quelle richieste: è costituito da un tubo a RX ad anodo fisso a finestra di Berillio della Seifert (Figura 2.1), raffreddato ad acqua, capace di operare fino a 160 kV, dotato di un fuoco grande delle dimensioni di $1,5 \times 1,5 \text{ mm}^2$ e di un fuoco piccolo di $0,4 \times 0,4 \text{ mm}^2$, dal gruppo di trasformazione ad alta tensione e da una unità di comando a console.

Non essendoci alcun vantaggio nell'usare un fuoco piccolo, tutte le misure sono state effettuate utilizzando il fuoco grande in modo da avere una maggiore intensità di emissione utilizzando correnti più elevate senza avere problemi

Tabella 2.1: *Principali caratteristiche del tubo a raggi X Seifert ISOVOLT 160 M2/0.4-1.5.*

| | | |
|---|------------------------------|-------------------------------|
| Tensione massima | 160 kV | |
| | <i>fuoco grande</i> | <i>fuoco piccolo</i> |
| Massima potenza dissipabile (Figura 2.2) | 1600 W | 640 W |
| Corrente alla tensione massima 160 kV | 10 mA | 4 mA |
| Dimensioni fuoco (mm) (EN 12 543) | 3.0 (≈ 1.5 IEC 336) | 0.85 (≈ 0.4 IEC 336) |
| Angolo di emissione del fascio | 40° | |
| Filtrazione inerente | 1 mm Be | |

di surriscaldamento dell'intero sistema di misura. Le caratteristiche principali dell'impianto sono riportate in Tabella 2.1.

La struttura di supporto, prevalentemente in alluminio, è costituito da quattro parti principali (Figura 2.4):

1. il telaio per il fissaggio, la regolazione e la schermatura del tubo;
2. un sistema automatico porta filtri per l'assorbimento di fasci di radiazioni in base alle raccomandazioni;
3. una camera a ionizzazione ad aria libera per monitorare la stabilità della radiazione X prodotta;
4. un banco ottico per la movimentazione degli strumenti di misura portatili e degli eventuali fantocci.

La potenza del tubo a raggi X è data dal prodotto tra la differenza di potenziale applicata e la corrente anodica (mA·kV) (Figura 2.2).

Una volta installato il sistema, al fine di renderlo operativo agli scopi, è stato necessario effettuare determinate misure e prove. Le norme di riferimento che si sono seguite sono state le ISO 4037 [1, 4, 5, 6].

Per rientrare nei limiti imposti dalla norma sulle caratteristiche spettrali e geometriche dei fasci X filtrati di bassa energia è stato necessario realizzare una attrezzatura specifica attorno all'impianto a raggi X.

La prima necessità è quella di ridurre sotto il 5% la radiazione diffusa e di fuga prodotta dall'impianto e dalle pareti della stanza in cui l'impianto è sistemato. Questo si è reso possibile con la realizzazione di una schermatura supplementare attorno al tubo radiogeno e con l'uso di appositi diaframmi (chiamati, spesso impropriamente, in campo radiologico collimatori) fra l'anodo del tubo ed il punto di misura.

Altre caratteristiche importanti sono la disponibilità di appositi diaframmi per delimitare il fascio mantenendone una buona omogeneità, la possibilità di poter scegliere il filtro e non ultimo di potere agire su un otturatore veloce e senza problemi di tempo morto.

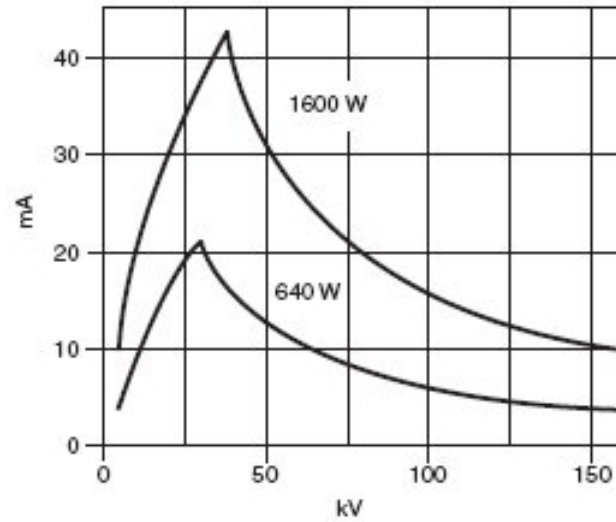


Figura 2.2: Andamento della potenza dissipata dall'anodo in funzione della tensione e corrente applicata al tubo a raggi X.

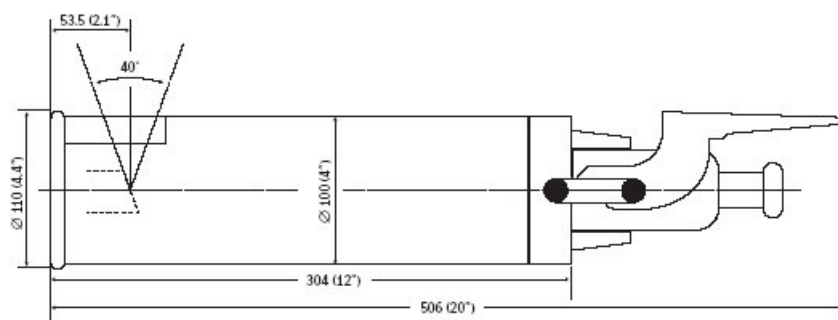


Figura 2.3: Dimensioni in mm del tubo.



Figura 2.4: Alloggiamento schermante del tubo a raggi X, sistema porta-filtri, camera a ionizzazione ad aria libera e banco ottico per il posizionamento della strumentazione di misura della radiazione ionizzante.

2.2.1 Parete schermante: radiazione diffusa

Il contributo della radiazione, causata dalla diffusione del fascio da parte dell'ambiente al Rateo di Esposizione totale, non deve superare il 5% del Rateo di Esposizione sull'asse centrale in corrispondenza della superficie da irraggiare [1]. L'entità dell'esposizione dovuta alla radiazione diffusa è stata valutata mediante l'ausilio di una camera a ionizzazione le cui variazioni di sensibilità nell'intervallo di energia fotonica considerato sono risultate essere piccole e comunque note.

In base a quanto richiesto dalla normativa [1] sono state effettuate due diverse verifiche:

1. La prima verifica consiste nella misura della radiazione diffusa e di fuga lungo l'asse centrale del fascio di radiazione a diverse distanze dal centro della superficie da irraggiare dal fuoco (Ratei di Esposizione assiali). In un intervallo assiale sufficientemente ampio, avente il centro sulla superficie da irraggiare, i valori dei Ratei di Esposizione assiali devono essere proporzionali, tenendo conto dell'attenuazione dell'aria, all'inverso del quadrato della distanza tra la superficie da irraggiare ed il fuoco (Figura 2.6).
2. La seconda verifica consiste nella misura del Rateo di Esposizione ad una distanza radiale pari al doppio del raggio del fascio più l'intervallo di penombra (Ratei di Esposizione radiali).

In Figura 2.5 sono riportati in modo dettagliato i punti di misura sia per la prima che per la seconda verifica richieste dalla normativa riguardo la valutazione della radiazione diffusa, entrambe effettuate con una camera a ionizzazione PTW mod. M23331 (Physikalisch-Technische Werkstatte GmbH, Freiburg, Germany) di 1 cm³ di volume.

I risultati ottenuti dalle due verifiche richieste sono riassunti in Tabella 2.2.

La radiazione diffusa rispetto a quella diretta è risultata essere, in entrambe le verifiche, sempre minore dell'1%, molto inferiore ai limiti imposti dalla normativa. Questo denota l'idoneità dell'alloggiamento schermante del tubo a raggi X realizzato appositamente per ridurre le fughe di radiazione nella direzione di emissione.

2.2.2 Gruppo otturatore: uniformità del fascio

Per considerare trascurabile l'incertezza introdotta dalla non uniformità d'irraggiamento e dal tempo morto di apertura e di chiusura dell'otturatore, i tempi di transito per la chiusura e l'apertura dello stesso dovrebbero risultare circa mille volte minori del tempo di esposizione.

Il fenomeno della possibile disomogeneità d'irraggiamento è stato invece eliminato ricorrendo ad un sistema di apertura e chiusura a tre stadi (Figura 2.7). Ogni ciclo viene compiuto sempre nello stesso verso in modo tale da compensare, sulla superficie in esposizione, nella chiusura la disomogeneità creata al momento dell'apertura.

Il tempo di transito dell'otturatore è comunque risultato essere inferiore a $(0,1 \pm 0,01)s$. Per rendere trascurabile ($< 1\%$) l'incertezza associata al tempo

Tabella 2.2: Valori di esposizione della radiazione diffusa lungo l'asse del fascio (a) e all'esterno del fascio (2-raggio + penombra) di radiazione X (b).

(a)

| 80 kV, 20 mA, 4 mm di Al + 2 mm di Cu | | |
|--|-----------------|---------------------|
| distanza (cm) | diffusa* (%) | incertezza (95%) |
| 40 | 0.2% | 1.2% |
| 60 | 0.2% | 0.8% |
| 80 | 0.3% | 0.6% |
| 100 | 0.4% | 0.5% |
| 120 | 0.4% | 0.4% |
| 140 | 0.5% | 0.3% |
| 160 | 0.6% | 0.3% |
| 180 | 0.7% | 0.3% |
| 200 | 0.8% | 0.2% |
| 220 | 0.8% | 0.2% |
| 100 kV, 10 mA, 4 mm di Al + 2 mm di Cu | | |
| distanza (cm) | diffusa (%) | incertezza (95%) |
| 40 | 0.2% | 1.1% |
| 60 | 0.2% | 0.7% |
| 80 | 0.3% | 0.6% |
| 100 | 0.4% | 0.4% |
| 120 | 0.5% | 0.4% |
| 140 | 0.6% | 0.3% |
| 160 | 0.7% | 0.3% |
| 180 | 0.8% | 0.2% |
| 200 | 0.8% | 0.2% |
| 220 | 0.9% | 0.2% |

* misura integrate su intervalli di 6 s.

(b)

| Dist. (cm) | Esposizione (R/min) | Esposizione (R/min) | diffusa/diretta (%) | err (95%) (%) |
|---------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------|
| | asse fascio* | 2r + penombra* | | |
| 40 | 782 | 29 | 0.004% | 2.3% |
| 60 | 345 | 27 | 0.008% | 4.3% |
| 80 | 192 | 24 | 0.013% | 1.4% |
| 100 | 122 | 18 | 0.015% | 3.5% |
| 120 | 86 | 16 | 0.019% | 3.9% |
| 140 | 62 | 13 | 0.021% | 5.1% |
| 160 | 48 | 12 | 0.025% | 6.0% |
| 180 | 38 | 12 | 0.032% | 5.4% |
| 200 | 30 | 11 | 0.037% | 3.7% |
| 220 | 25 | 11 | 0.044% | 4.2% |

* misura integrate su intervalli di 6 s.

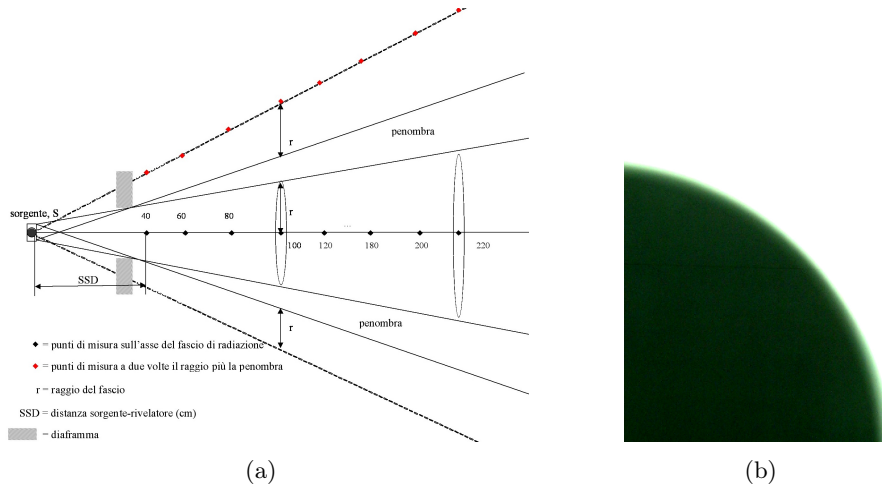


Figura 2.5: (a) Dettaglio dei punti di misura per la valutazione della radiazione diffusa dentro e fuori fascio e della penombra dovuta alla sorgente non puntiforme (disegno non in scala). (b) Dettaglio della penombra ottenuta dopo irraggiamento su lastra fotografica MIN-R Kodak 18 x 24 cm.

di apertura e chiusura dell'otturatore, il tempo dell'irraggiamento deve essere almeno 100 volte più della riproducibilità di apertura e chiusura ($100 \times 0,01$) = 1 s. Tali condizioni permettono quindi di tenere conto ed usare il temporizzatore automatico anche per irraggiamenti di pochi secondi.

L'uniformità spaziale del fascio di radiazione X è stata verificata mediante una camera a ionizzazione PTW mod. M23331 e una lastra radiografica MIN-R 2000 KODAK (lastre per mammografia). La camera ha un diametro esterno inferiore a 10 mm come compromesso fra sensibilità e definizione spaziale dell'area misurata.

Nelle condizioni di lavoro, la variazione percentuale dell'Esposizione, rispetto al centro del fascio, è risultata essere non superiore al $\pm 0,5\%$ entro il diametro utile, come riportato in Figura 2.8, per entrambe gli assi.

E' stata inoltre effettuata una mappatura di una lastra fotografica esposta per 40 s a 30 kV e 5 mA ad una distanza nominale lungo il banco ottico pari ad 80 cm. Il programma utilizzato per l'analisi dell'immagine è IMAQ Visual Builder della National Instruments. I risultati ottenuti, riportati in Figura 2.9, sono confrontabili con quelli ottenuti mediante una misura puntuale con la camera a ionizzazione.

2.2.3 Sistema porta filtri

Un diaframma in piombo di spessore pari a 4 mm all'uscita del tubo e due diaframmi fissi di 3 mm ai lati della camera a ionizzazione limitano le dimensioni del fascio di radiazione. La filtrazione totale del fascio è dovuta a tutti i materiali presenti tra la sorgente di radiazione (corrispondente al fuoco del tubo) ed il punto di misura. Essa, come è noto, è costituita dalla filtrazione inerente del tubo, dalla filtrazione addizionale, dall'eventuale spessore delle pareti della

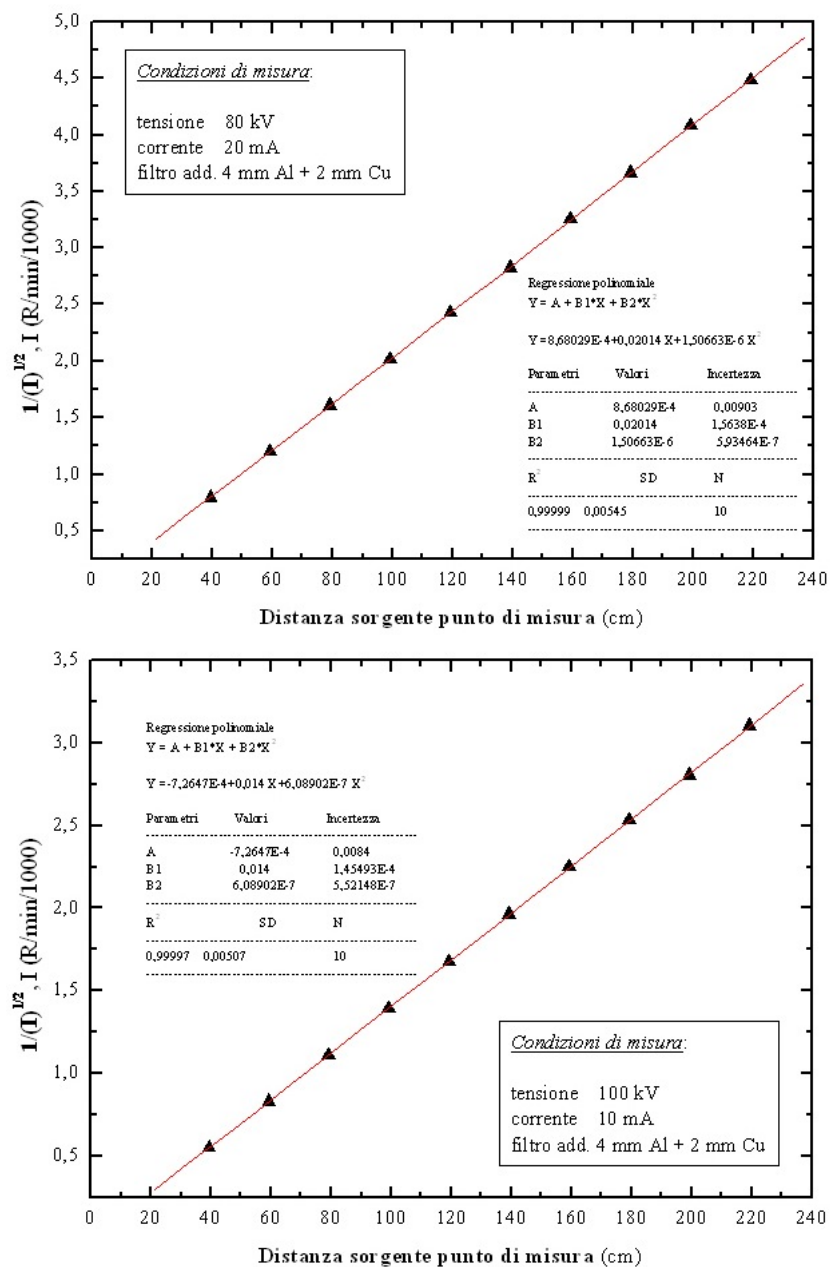


Figura 2.6: Verifica della proporzionalità dei valori dei ratei di esposizione assiali all'inverso del quadrato della distanza tra la superficie da irraggiare ed il fuoco in due diverse condizioni di misura.

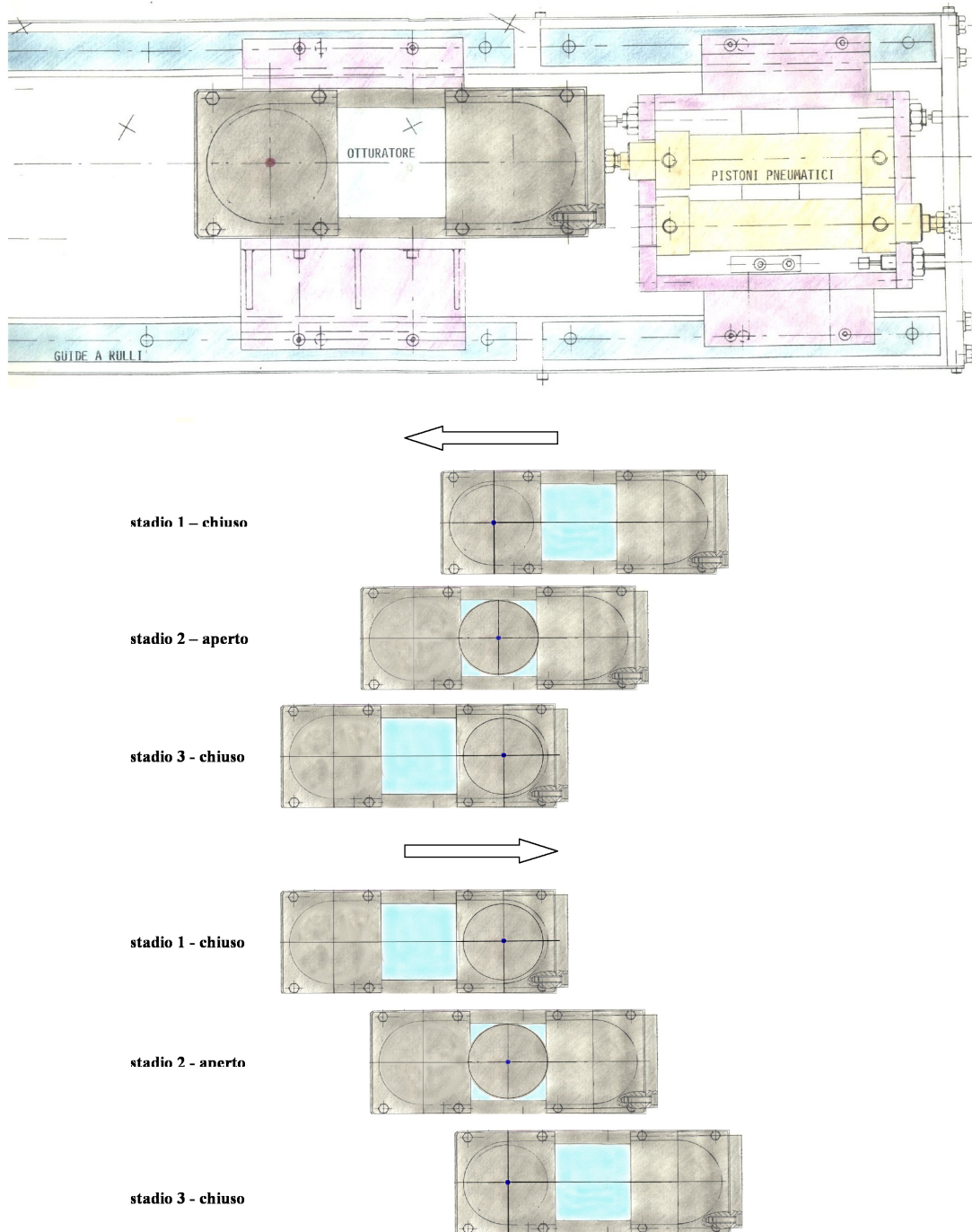
Sistema di apertura e chiusura di un otturatore a tre stadi

Figura 2.7: *Otturatore a tre stadi (tipo macchina fotografica).*

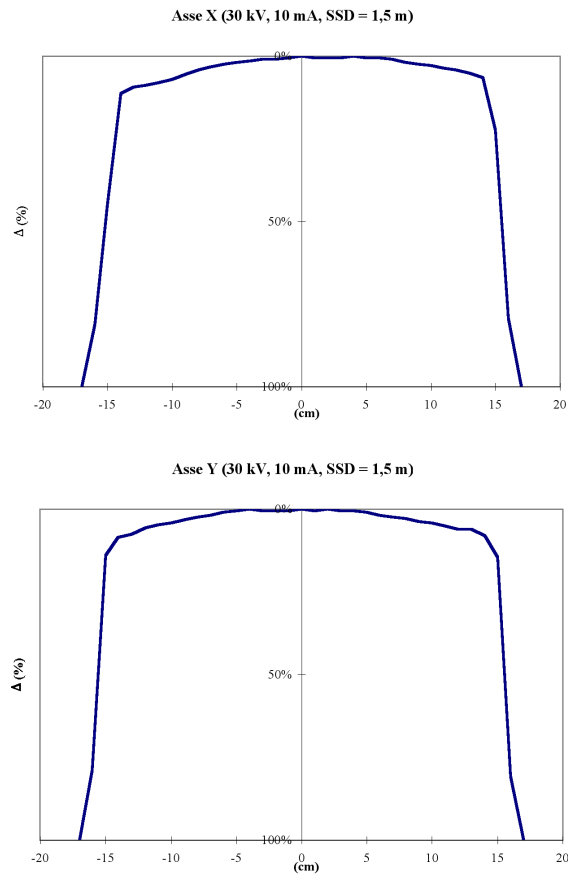


Figura 2.8: Variazione percentuale (Δ) dell'intensità (I) del fascio di radiazione X rispetto all'intensità (I_0) ad 1.5 m nominale dalla sorgente sul banco ottico, in funzione della distanza radiale dal punto di riferimento. Tale variazione risulta inferiore a $\pm 0.5\%$ entro un diametro di 5 cm.

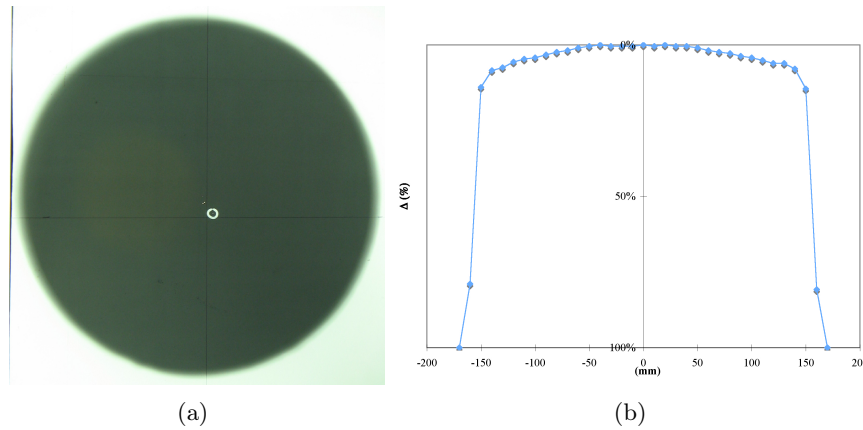


Figura 2.9: (a) Immagine della lastra irraggiata. (b) Variazione percentuale (Δ) dell'intensità (I) del fascio di radiazione X rispetto all'intensità (I_0) a 80 cm nominali dalla sorgente sul banco ottico, in funzione della distanza radiale dal punto di riferimento ottenuta con l'analizzatore di immagini IMAQ Visual Builder. Tale variazione risulta inferiore a $\pm 0,5\%$ entro un diametro di 5 cm.

camera di controllo e dallo strato d'aria che si trova tra la finestra di uscita del tubo ed il punto di misura.

La realizzazione dei fasci di riferimento avviene attraverso la selezione di combinazioni opportune fra tensioni applicate al tubo e filtri di assorbimento realizzati con piombo (Pb), stagno (Sn), rame (Cu) ed alluminio (Al).

Poiché l'emissione di radiazioni caratteristiche di fluorescenza può aver luogo anche da parte dei materiali che costituiscono la filtrazione fissa del fascio di radiazione X, è necessario disporre la serie dei filtri dei diversi materiali ordinati secondo il numero atomico con il filtro di numero atomico più basso posto verso l'esterno, in modo tale che ogni filtro assorba la radiazione caratteristica emessa dal filtro precedente. La radiazione caratteristica emessa dall'ultimo filtro, generalmente costituito da alluminio, ha una energia tale da essere assorbita da pochi centimetri di aria.

I materiali utilizzati per le filtrazioni addizionali, grazie ai quali sono realizzate le diverse qualità di radiazione X, sono caratterizzati da un elevato grado di purezza (Tabella 2.3) ed il loro spessore è noto con un'accuratezza di $\pm 0,01$ mm.

Tabella 2.3: Proprietà dei metalli.

| Tipo di metallo [*] | Densità nominale (g/cm ³) |
|------------------------------|---------------------------------------|
| Alluminio (Al) | 2,70 |
| Rame (Cu) | 8,94 |
| Piombo (Pb) | 11,3 |
| Stagno (Sn) | 7,2 |

^{*} Purezza minima: 99,9%

La selezione del filtro appropriato avviene attraverso un sistema rotante elettro-meccanico il quale sorregge un disco intercambiabile contenente 8 combinazioni possibili di filtri (Figura 2.10).

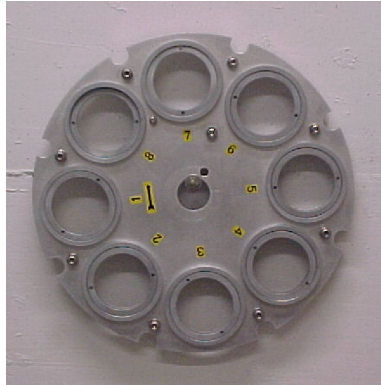


Figura 2.10: *Sistema porta-filtri.*

2.2.4 Camera a ionizzazione ad aria libera

Lungo l'asse del fascio di radiazione, oltre il sistema porta-filtri, è disposta una camera a ionizzazione ad aria libera. Questa è fissata su di un supporto indipendente solidale, in modo diretto, con il pavimento al fine di eliminare le vibrazioni derivanti dall'apertura e chiusura dell'otturatore.

Il braccio di sostegno è regolabile per una centratura fine nelle tre coordinate spaziali. La camera è necessaria per il controllo delle variazioni di intensità di emissione dovute alle fluttuazioni della tensione del tubo a raggi X ed è anche utilizzata come limitatore del fascio.

La camera a ionizzazione ha enorme importanza per l'accuratezza delle misure e per un controllo diretto della stabilità nell'emissione dell'impianto durante il tempo di esposizione. La camera deve avere grande stabilità e bassa dipendenza dall'energia nell'intervallo spettrale di interesse.

2.3 Messa a punto dell'impianto radiologico: condizioni geometriche

Il campo di radiazioni varia nello spazio per diverse cause: la distanza assoluta dalla sorgente, la dimensione e la forma della sorgente, l'assorbimento dell'aria (in modo particolare nel dominio energetico considerato), le interazioni sui collimatori e la presenza di radiazione diffusa dalla cuffia, dalle pareti della stanza in cui si trova l'impianto e dall'aria stessa.

Risulta chiaro perciò come l'accuratezza dei valori di esposizione misurabili sia legata all'accuratezza di posizionamento. E' quindi indispensabile disporre di un sistema che possa posizionare con estrema accuratezza, in tutte le tre coordinate spaziali, i punti di riferimento di strumentazione e/o dosimetri, qualsiasi sia la loro forma geometrica.

2.3.1 Metodo di allineamento

L'impianto dispone di un banco ottico che è stato allineato con l'asse del fascio di radiazione X. La procedura che si è utilizzata consiste nell'allineare il banco ottico al fascio di luce emessa da un laser ad esso solidale, posto su di una colonnina. Si esegue poi la centratura del fuoco della sorgente di radiazioni ionizzanti sul fascio emesso dal laser. Successivamente si è regolato l'impianto in modo che il punto di emissione della luce laser si trovasse al centro del fascio di radiazione X. In questo modo il fascio laser rappresenta sempre il centro del fascio di radiazioni ionizzanti ed il carrello del banco ottico mantiene anche proporzionalmente negli spostamenti la sua posizione nel fascio.

L'allineamento del fascio di radiazione X con il fascio laser è stato verificato in diversi modi: sia con l'effettuazione di misure puntuali mediante una camera a ionizzazione posizionata in diversi punti lungo il diametro orizzontale e verticale della sezione del fascio sia mediante radiografie del fascio effettuate a diverse distanze in modo da garantire, con la medesima precisione, l'allineamento del campione a diverse possibili distanze dalla sorgente.

2.3.2 Il banco ottico

Il carrello è progettato per sostenere tutti gli strumenti necessari alle tarature ed agli irraggiamenti utilizzando, a scelta, un ripiano adatto sia per gli strumenti portatili che per i fantocci standard ISO, due morsetti contrapposti per alternare campioni di misura con sonde in taratura ed un ripiano ruotabile per prove angolari. Il carrello è realizzato in modo da ridurre al minimo la perturbazione dello stesso sul fascio primario di radiazione X rimanendo quasi totalmente fuori dal fascio.

Il posizionamento verticale è motorizzato e per la centratura degli oggetti sul fascio di radiazione X viene impiegato il laser posto su di un supporto al termine del banco ottico provvisto di una regolazione per l'allineamento tra fascio e banco ottico.

Il carrello scorre su guide rettifiche di lunghezza pari a 2500 mm. La distanza dal tubo a raggi X può essere fatta in modo automatico con preimpostazione o manualmente con una accuratezza pari a 0,1 mm. L'accuratezza indicata è ottenuta mediante un aggiustamento fine (facilitato dalla movimentazione a cremagliera) e da un *encoder*¹ incrementale sull'ingranaggio e dagli accurati allineamenti delle movimentazioni del carrello.

¹Apparato elettromeccanico che converte la posizione angolare del suo asse rotante in un segnale elettrico digitale. Esso è un trasduttore di posizione economico, preciso, robusto ed affidabile.

Capitolo 3

Caratterizzazione di una camera a ionizzazione ad aria libera per il controllo della stabilità dei fasci X di bassa energia

3.1 Introduzione

Storicamente i fasci di raggi X, impiegati nelle ricerche di dosimetria, erano generati da impianti originariamente progettati per impieghi terapeutici e/o industriali. Tali impianti non avevano elevate caratteristiche di stabilità e potevano avere fluttuazioni dell'intensità del fascio anche del 5-10%, legate soprattutto alla instabilità della tensione di alimentazione del tubo. Tali variazioni non sono accettabili nelle misure in campo metrologico. D'altra parte la tecnologia non permetteva la realizzazione di dispositivi elettronici capaci di controllare e correggere tali fluttuazioni se non utilizzando generatori statici (es. Van der Graff) molto costosi. Per ovviare a tale inconveniente si è introdotto l'uso di una camera monitor che viene, in modo permanente, attraversata dal fascio di radiazione. Essa deve avere caratteristiche tali da non perturbare il fascio e da permettere una misura della carica raccolta con una precisione inferiore a qualche per mille. In tal modo lo strumento permetterà di ricavare le esposizioni corrette per le eventuali fluttuazioni dell'impianto a raggi X.

Attualmente nelle ricerche di dosimetria si utilizzano tubi a raggi X molto stabili con una variazione dell'intensità del fascio molto minore all'1%, ma la camera monitor non perde la sua importanza in quanto indispensabile comunque a ridurre le incertezze di misura, a verificare che non ci siano errori nella procedura e come campione secondario per irraggiamenti su dosimetri.

La camera di controllo è una camera a ionizzazione la cui funzione è quella di controllare la stabilità del Rateo di Esposizione durante l'irraggiamento e tramite la quale tutte le misure effettuate con fasci di radiazione X possono essere normalizzate ad un valore di riferimento dell'intensità e dell'energia della radiazione. Questo permette di tenere conto delle possibili variazioni di tensione

del tubo a raggi X e di confrontare le misure, eseguite in irraggiamenti successivi, sia con un campione secondario che con un dosimetro da tarare.

La caratteristica principale della camera di controllo è la elevata riproducibilità delle misure con essa effettuate, sia a breve che a lungo termine. La stabilità complessiva della camera di controllo e del sistema di misura associato deve, infatti, consentire di effettuare misure con una riproducibilità di almeno qualche per mille [48].

Nel capitolo sono descritte, in dettaglio, le caratteristiche costruttive della camera a ionizzazione ad aria libera impiegata per il controllo della stabilità dei fasci di raggi X prodotti dal tubo a raggi X SEIFERT ISOVOLT M2 160/0.4-1.5 di bassa energia. Sono riportati, inoltre, i risultati delle misure effettuate per determinare le caratteristiche dello strumento costruito in oggetto.

3.2 Misura dell'esposizione

La determinazione sperimentale della grandezza kerma in aria, K_a , richiede la misura della ionizzazione per unità di massa prodotta da tutti gli elettroni originati in un certo volume di aria intorno al punto di interesse. Affinché ciò sia possibile è necessario che vengano soddisfatte le condizioni di equilibrio di particelle cariche¹ condizione necessaria da assicurare quando si voglia fare una misura di esposizione [49].

I rivelatori che meglio si prestano a tale scopo sono le camere a ionizzazione aria equivalenti.

Affinché una camera monitor possa adempiere alle funzioni precedentemente descritte è necessario che soddisfi determinati requisiti:

1. non deve produrre nel volume di misura radiazione diffusa;
2. la presenza della camera monitor non deve indurre, per assorbimento, variazioni apprezzabili nella distribuzione spettrale emessa;
3. è necessario che la camera sia termicamente isolata dal tubo, che l'aria al suo interno circoli liberamente e che sia presente una rivelazione costante dei parametri ambientali (temperatura, pressione ed umidità) in modo da potere apportare la necessaria correzione per la massa volumica dell'aria.

Per temperature tra 15°C e 25°C, la densità dell'aria ρ è data dalla seguente formula (Drake e Böhm) [8]:

$$\rho = \rho_0 \cdot \left[1.005699 \cdot \frac{p}{p_0} - \frac{1}{175.7} \cdot \frac{r}{r_0} \cdot \left(\frac{T}{T_0} \right)^{17.79} \right] \cdot \frac{T_0}{T} \quad (3.1)$$

¹Si parla in genere di equilibrio di radiazione o di equilibrio completo di radiazione in un certo punto di un mezzo irradiato quando il valore atteso dell'energia radiante che entra in un volume infinitesimo intorno a quel punto è uguale a quello dell'energia radiante che ne esce. Talvolta può accadere che in un certo punto dello spazio le condizioni sopra richiamate siano verificate soltanto per un particolare gruppo di particelle. Non si avrà in tal caso l'equilibrio completo di radiazione, ma soltanto l'equilibrio relativo a quel particolare gruppo di particelle.

dove p è la pressione dell'aria, $p_0 = 101.3$ kPa;

T è la temperatura dell'aria, $T_0 = 293.15$ (equivalente a 20°C)

r è l'umidità relativa dell'aria $r_0 = 0.65$ (equivalente a 65%)

ρ è la densità dell'aria al momento della misura, $\rho_0 = 1.974$ kg/m³.

3.3 Descrizione della camera monitor

La necessità che per la camera monitor siano rispettate le condizioni di equilibrio elettronico per le energie dei raggi X in esame pone dei limiti sulla distanza tra il piano di definizione dell'esposizione ed il volume di raccolta, e quindi tra il diaframma delimitante il fascio ed il centro dell'elettrodo di raccolta: tale distanza deve essere pari al massimo percorso in aria degli elettroni secondari liberati dalla radiazione in esame.

Rispettando tale condizione è stata progettata e realizzata presso il Centro di Taratura, la camera a ionizzazione ad aria libera presentata in Figura 3.1.

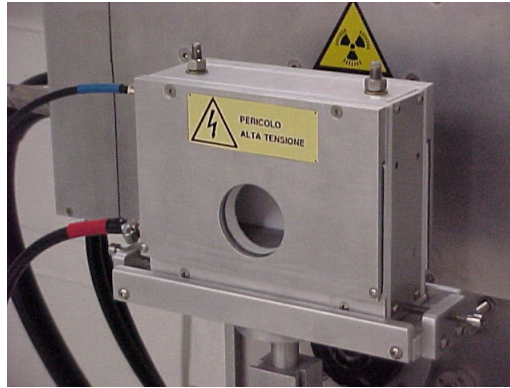


Figura 3.1: Vista frontale dell'alloggiamento schermante del tubo a raggi X e della camera monitor per il controllo della stabilità del fascio di radiazioni.

Le dimensioni lineari della camera (Figura 3.1) e degli elettrodi sono ottimizzati alla raccolta degli elettroni secondari prodotti indirettamente dalla radiazione ionizzante.

La camera monitor consiste di una camera ad elettrodi piani paralleli, l'uno collegato all'alta tensione, l'altro connesso a terra attraverso uno strumento per la misura della carica. I fotoni penetrano nel volume sensibile della camera attraverso un diaframma realizzato in Piombo. Il volume di misura è individuato dall'intersezione del volume di raccolta con il cono di radiazione proveniente dall'apertura del diaframma.

La carica misurata è uguale a quella prodotta nel volume di misura e divisa per la massa di questo ultimo permette di ottenere il valore dell'esposizione che descrive la capacità della radiazione elettromagnetica di produrre ionizzazione in aria.

La camera a ionizzazione ha un volume di raccolta di 19 cm^3 circa che la ren-

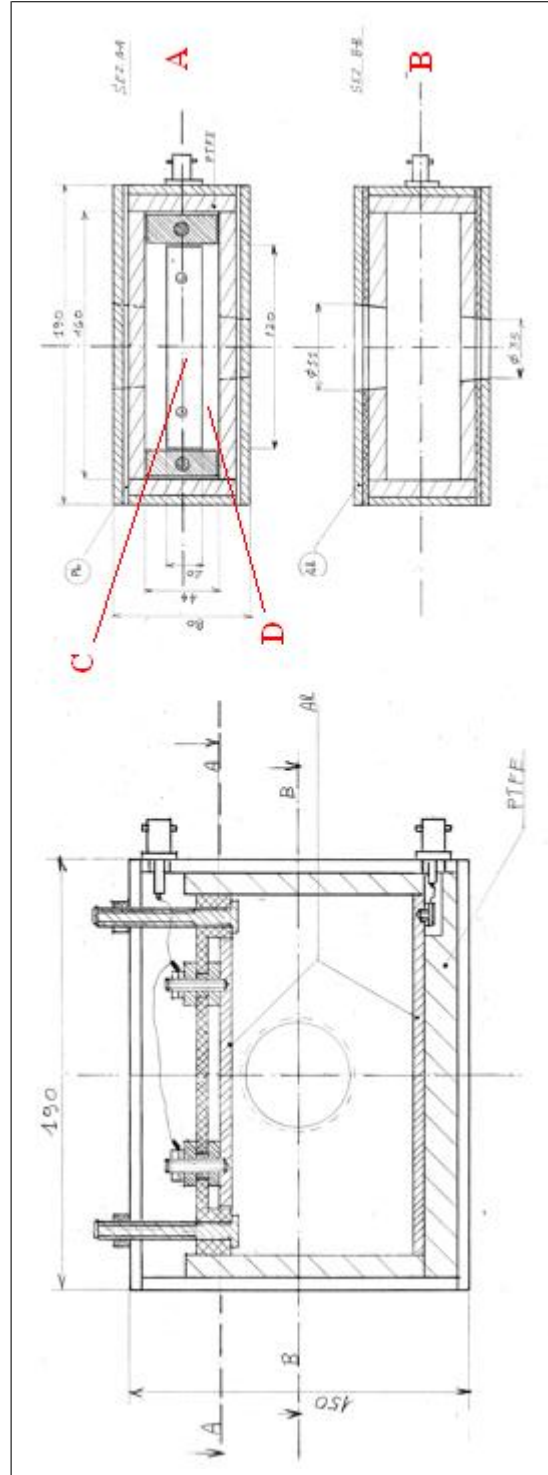


Figura 3.2: Sezione longitudinale e trasversale della camera a ionizzazione ad aria libera, con particolare degli elettrodi (A) e (B), dell'elettrodo di raccolta (C) e dei materiali di cui è composta (misure in mm).

de sufficientemente sensibile anche per l'impiego dei più bassi ratei richiesti in radioprotezione.

L'isolamento in PTFE² della camera a ionizzazione permette l'applicazione agli elettrodi di una tensione di polarizzazione anche superiore a 10 kV.

Questa tensione può essere necessaria per evitare ricombinazioni significative delle cariche elettriche prodotte dalla radiazione ionizzante come nel caso della produzione di fasci più intensi, di interesse nella terapia medica.

Il supporto della camera è indipendente dalle altre parti del sistema per evitare la trasmissione delle vibrazioni delle parti in movimento ed è dotato di una regolazione fine per la centratura con il fascio di radiazione. La camera è facilmente smontabile per un'eventuale pulizia del PTFE.

La camera ha forma di parallelepipedo ed è contenuta in un involucro di Piombo (Pb) di spessore pari a 3 mm.

Affinché il fascio di raggi X attraversi la camera monitor senza essere attenuato da materiale diverso dall'aria e senza dare luogo a radiazione diffusa, è stato necessario ricavare un foro di ingresso di diametro $\varnothing = 35$ mm e uno di uscita di diametro $\varnothing = 51$ mm perfettamente coassiali, in modo inoltre da ridurre al minimo la presenza di penombra.

Dei due elettrodi, quello tenuto ad alta tensione è costituito da una semplice lastrina a forma di parallelepipedo, mentre la struttura dell'elettrodo collettore (Figura 3.2) è più complessa, risultando suddivisa in due parti: un anello che funge da elettrodo di guardia (D) in quanto tenuto a potenziale di terra, riduce la distorsione delle linee di campo elettriche ai bordi del volume di raccolta delle cariche, e l'elettrodo di raccolta (C) vero e proprio inserito in una sede rettangolare ricavata in detto parallelepipedo.

L'elettrodo ad alta tensione ed elettrodo collettore, mantenuti isolati dall'involucro esterno tramite una struttura di teflon, sono collegati a due connettori montati sull'involucro esterno, a loro volta connessi rispettivamente all'alta tensione ed al sistema di misura della carica; l'elettrodo di guardia è messo a terra tramite l'involucro esterno cui è collegato.

La camera monitor non deve consentire una misura assoluta di esposizione, ma deve solo fornire un riferimento lineare per la normalizzazione delle misure effettuate con altre camere di riferimento. Non è quindi necessario valutare tutti quei fattori correttivi che si applicano ad una camera ad aria libera, quale *standard primario* di misura, per la misura dell'esposizione (correzione per lo scattering, per la ricombinazione, per l'assorbimento dell'aria,...) [55]. L'unico fattore correttivo indispensabile è quello relativo alla massa volumica dell'aria del volume di raccolta: a tale scopo ad ogni misura è stata monitorata pressione e temperatura.

²Materiale appartenente al gruppo delle olefiniche, il politetrafluoroetilene (commercialmente detto teflon) è ottimo per la realizzazione di componenti meccanici per scorrimento, visto il suo basso coefficiente d'attrito, la sua elevata resistenza al calore, la non infiammabilità. Ottimo materiale isolante, con elevata resistenza agli agenti chimici ed ai solventi.

Tabella 3.1: *Principali caratteristiche costruttive della camera a ionizzazione ad aria libera per campi di radiazioni X di bassa energia.*

| | |
|---|-----|
| Distanza elettrodi (cm) | 6 |
| Larghezza elettrodo di raccolta (cm) | 1,4 |
| Lunghezza elettrodo di raccolta (cm) | 12 |
| Diametro del fascio definito dal diametro del foro di ingresso (cm) | 3,5 |
| Volume di raccolta (cm ³) | 19 |

3.4 Sistema di misura della carica

La carica raccolta dalla camera monitor è accumulata su di un condensatore di capacità C misurato con una accuratezza migliore dell'uno per mille (il condensatore è sostituibile ma normalmente viene utilizzato un condensatore di capacità $C_m = 50$ nF), posto in serie all'elettrodo di raccolta della camera monitor: la differenza di potenziale letta ai capi del condensatore, corretta per la massa volumica dell'aria, serve come valore di normalizzazione per la lettura effettuata alternativamente con lo standard o con il campione secondario di misura da tarare. La precisione del sistema di misura della carica deve essere la stessa sia per la camera di controllo che per il campione secondario di misura. La acquisizione dei dati di carica delle due camere deve avvenire contemporaneamente per potere effettuare le operazioni di normalizzazione ad un irraggiamento di riferimento. Il sistema di misura impiegato, completamente automatizzato, sfrutta due elettrometri Keithley Model 6514 che lavorano contemporaneamente in feedback esterno con i condensatori di raccolta della camera di controllo e del campione secondario di misura.

3.5 Sistema di misura dei parametri ambientali

Nelle misure di carica relative ad irraggiamenti non contemporanei è necessario normalizzare i valori ottenuti in differenti condizioni ambientali (temperatura pressione ed umidità) ad identiche condizioni ambientali di riferimento. Infatti la carica prodotta dalla radiazione all'interno di una camera a ionizzazione varia con il variare della densità dell'aria all'interno della camera stessa.

Le condizioni ambientali di riferimento sono $T_0 = 293,15$ K per la temperatura, $P_0 = 101,3$ kPa per la pressione e $U_{r0} = 50\%$ per l'umidità.

Il Centro di Taratura dispone di strumenti idonei per la rilevazione dei dati ambientali, e di un adeguato impianto di climatizzazione che mantenga tali parametri il più possibile stabili.

Gli strumenti per la rivelazione dei dati ambientali sono costituiti da opportune sonde il cui segnale viene acquisito direttamente dall'unità di controllo esterna alla sala di irraggiamento.

3.6 Prestazioni della camera monitor

L'impiego della camera monitor è avvenuto a seguito della determinazione della curva di saturazione in funzione della differenza di potenziale applicata alla stessa, misurata per ogni fascio di radiazione nell'intervallo energetico di interesse e della tensione di lavoro della camera.

In seguito, è stato verificato che la risposta in funzione dell'energia del fascio incidente della camera monitor fosse indipendente da essa per tutte le energie di interesse.

Preliminare all'impiego della camera monitor è la determinazione della tensione di lavoro della camera, corrispondente alla differenza di potenziale che deve essere applicata tra gli elettrodi per assicurare la completa raccolta delle cariche formatesi all'interno del volume di raccolta. E' necessario quindi determinare la curva di saturazione della camera riportando in grafico la carica raccolta (in pratica la differenza di potenziale ai capi del condensatore) in funzione della differenza di potenziale applicata alla monitor.

La curva ottenuta, all'inizio rapidamente crescente, da un certo valore di differenza di potenziale in poi tende asintoticamente ad una retta orizzontale, che rappresenta le condizioni di saturazione, in corrispondenza delle quali la carica raccolta è indipendente dal valore di differenza di potenziale applicata.

Le misure sono state effettuate utilizzando la camera a ionizzazione PTW Freigurg mod. M23331 ad una distanza sorgente-rivelatore pari a 1 m, con misure integrate di 60 s.

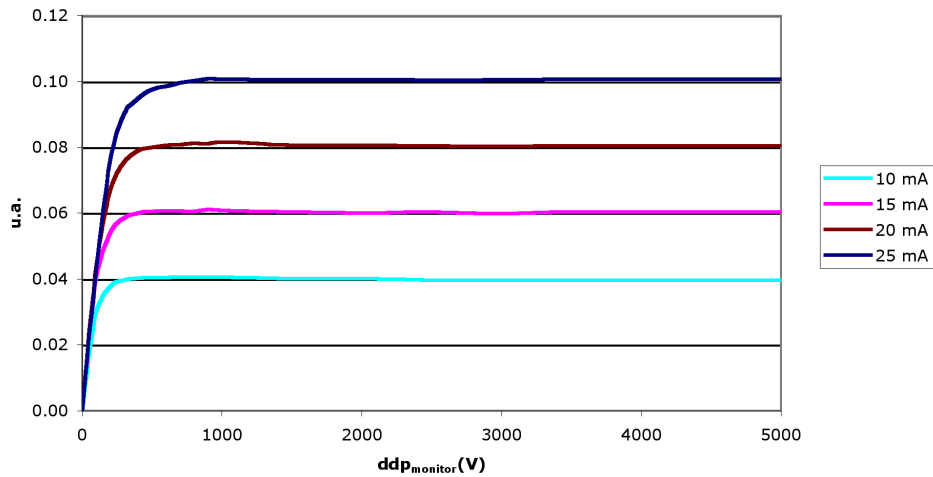


Figura 3.3: Curva di saturazione della camera monitor. Ogni punto è il valore medio di tre misure. Gli errori sperimentali non sono apprezzabili sulla scala. u.a. = lettura camera monitor.

In pratica, il punto di lavoro della camera viene scelto in modo tale che

eventuali fluttuazioni dell'intensità del fascio non influenzino in maniera significativa il valore della carica raccolta. Una tipica curva di saturazione per la camera monitor, oggetto del presente capitolo, è riportata in Figura 3.3. Dalla figura si ricava che già una ddp di 1500 V rappresenta una conveniente tensione di lavoro.

E' stato però necessario misurare una curva di saturazione per ogni qualità di radiazione nel dominio energetico studiato al variare della corrente, in quanto per fasci di radiazione appartenenti alla famiglia *High Air-Kerma Rate series* (H) si è verificata la necessità di impiegare una tensione di lavoro maggiore al fine di raggiungere la saturazione (Figura 3.4).

Nonostante la tensione di lavoro scelta, 5000 V, sia abbastanza elevata per la Serie H è stato necessario applicare delle limitazioni sulla corrente, scelta giustificata dalla necessità di evitare eventuali perdite di carica anche in presenza di intensità di radiazioni molto elevate. Alla tensione di lavoro scelta, il valore della corrente di perdita è risultato dell'ordine di 10^{-14} A, trascurabile rispetto a quelle che generalmente vengono misurate, e comunque pari ai minimi valori riscontrati in qualsiasi camera a ionizzazione.

3.7 Determinazione del volume di raccolta della camera

Il volume di raccolta della camera di controllo è stato calcolato sia con metodo analitico sia indirettamente mediante misura della carica raccolta.

Le differenze ottenute applicando i due metodi sono da attribuirsi ai seguenti fattori:

- una possibile distorsione del campo elettrico;
- il non perfetto allineamento fra il foro di ingresso della radiazione X e quello di uscita creando possibili effetti di radiazione diffusa;
- la presenza di penombra causata dalla sorgente di radiazione non puntiforme.

In Figura 3.5 è mostrato in modo schematico la posizione della sorgente rispetto la camera monitor ed il particolare del volume di raccolta per quanto riguarda le dimensioni e la forma.

Il volume, $V_{tronco\ di\ cono\ retto} = \pi \cdot \frac{c}{3} (a^2 + b^2 + a \cdot b)$ è stato calcolato sia considerando la sorgente non puntiforme sia il non perfetto allineamento dei fori di ingresso ed uscita.

I risultati ottenuti con il metodo analitico confermano entro l'1% quelli ottenuti con una misura diretta della carica raccolta all'interno della camera stessa.

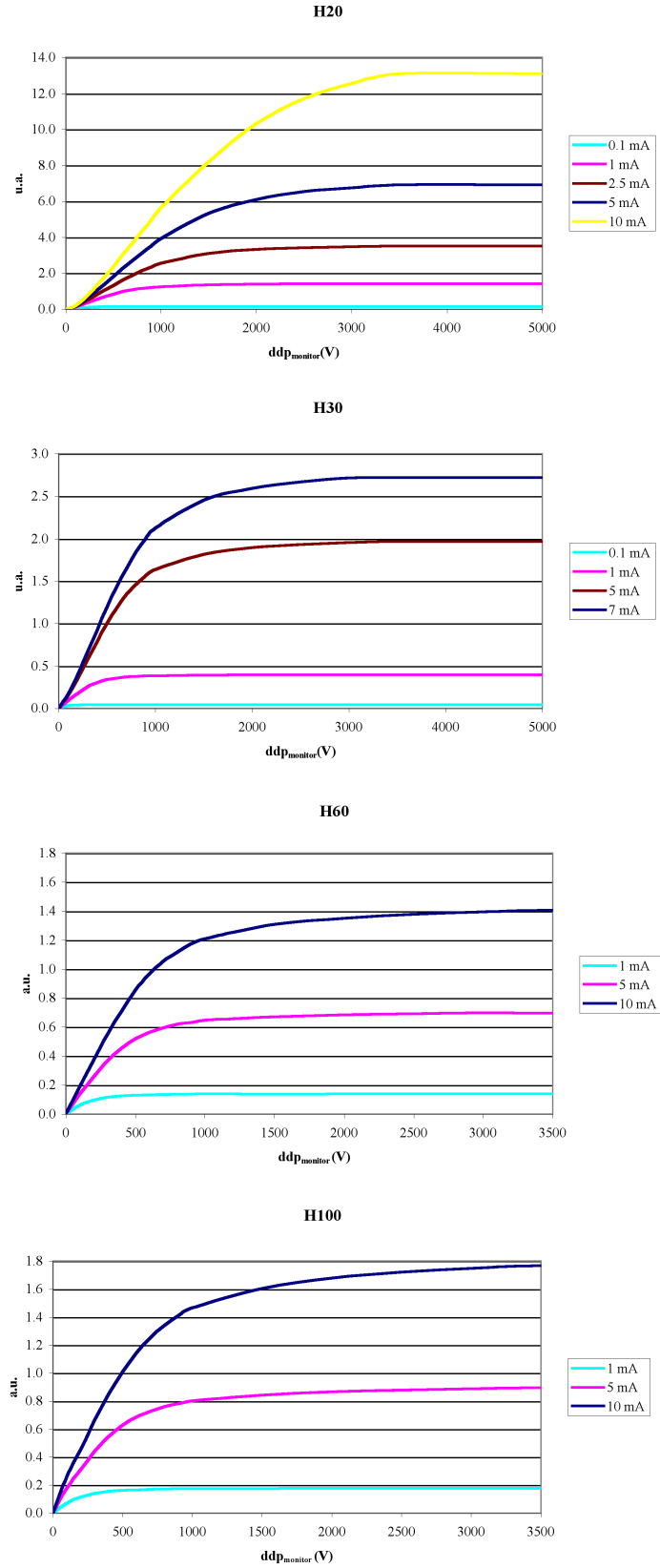


Figura 3.4: *Curva di saturazione per la camera monitor della radiazione H20, H30 e H60, H100 della serie H.*

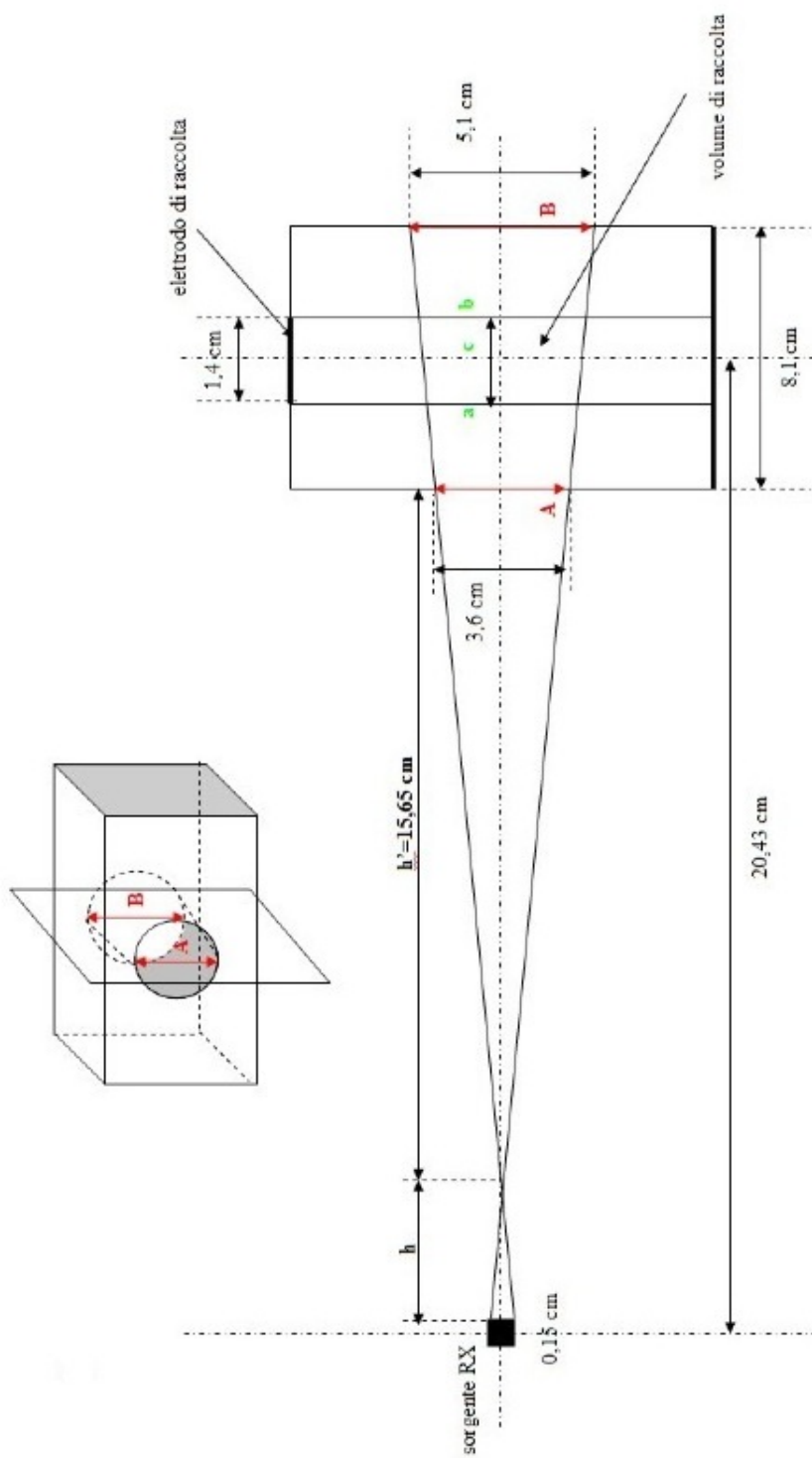


Figura 3.5: Schema della camera monitor e particolare del volume di raccolta e degli elementi indispensabili al calcolo dello stesso con metodo analitico.



Figura 3.6: *Camera cilindrica ad aria libera (SM1) impiegata come camera di riferimento per la misura di spessori emivalenti per ogni fascio di radiazione.*

3.8 Curva di dipendenza dall'energia della camera monitor

E' necessario prima di impiegare una camera di controllo per effettuare misure in un determinato dominio energetico, conoscere in modo dettagliato la sua risposta in funzione dell'energia. Essendo la camera monitor (FM1) fissa non è stato possibile effettuare una sua caratterizzazione diretta. A tale scopo è stata utilizzata una camera campione cilindrica ad aria libera (SM1) con riferibilità metrologica ai campioni primari (tarata con accuratezza del 2%) (Figura 3.6). Tale camera è stata impiegata, anche, nelle misure di spessori emivalenti (metodo dosimetrico). Anch'essa è stata interamente progettata e sviluppata presso il Centro di Metrologia. La camera ad aria libera cilindrica è risultata indipendente dall'energia per $E \leq 30 \text{ keV}$. In Tabella 3.2 e 3.3 sono riportati rispettivamente i fattori di taratura della camera a ionizzazione cilindrica ad aria libera (SM1) e della camera monitor (FM1). E' evidente come la camera monitor risulti indipendente dall'energia fino a 30 keV, per energie superiori è stata utilizzata una camera a pareti aria-equivalenti (o a ditale).

I risultati ottenuti sono riportati in Figura 3.7 e 3.8 per tutti i fasci X filtrati considerati.

Tabella 3.2: *Fattore di taratura della camera cilindrica ad aria libera (FT_{SM1}) in funzione dell'energia dei fasci di radiazione studiati.*

| Qualità radiazione | FT_{SM1} (mGy/nC) |
|-------------------------------|---|
| N10 | 4,069 |
| N15 | 4,098 |
| N20 | 4,074 |
| N25 | 4,117 |
| N30 | 4,136 |
| N40 | 3,435 |
| 5 kV | 4,031 |
| 7,5 kV | 4,038 |
| H10 | 4,047 |
| H20 | 4,030 |
| H30 | 4,093 |
| H60 | 2,758 |
| L10 | 4,100 |
| L20 | 4,114 |
| L30 | 4,123 |
| L35 | 3,853 |

Tabella 3.3: *Fattore di taratura della camera monitor (FT_{FM1}) in funzione dell'energia dei fasci di radiazione studiati.*

| Qualità radiazione | E_m (keV) | FT_{FM1} (mGy/nC) |
|-------------------------------|-----------------------------------|---|
| 5 kV | 4,8 | 1,6786 |
| 7,5 kV | 6,6 | 1,6553 |
| L10 | 8,5 | 1,8556 |
| L20 | 17 | 1,8144 |
| L30 | 26 | 1,7929 |
| L35 | 30 | 1,6652 |
| N10 | 8 | 1,7637 |
| N15 | 12 | 1,7873 |
| N20 | 16 | 1,7581 |
| N25 | 20 | 1,7380 |
| N30 | 24 | 1,7087 |
| N40 | 33 | 1,4262 |
| H10 | 7,5 | 1,6940 |
| H20 | 12,9 | 1,7890 |
| H30 | 19,7 | 1,7467 |
| H60 | 37,3 | 1,2734 |

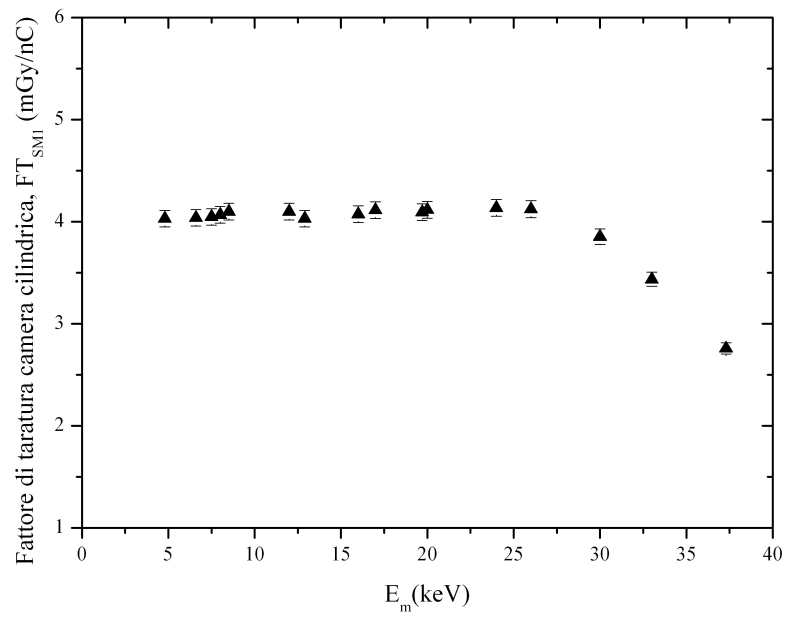


Figura 3.7: *Curva di dipendenza dall'energia della camera cilindrica ad aria libera (SM1).*

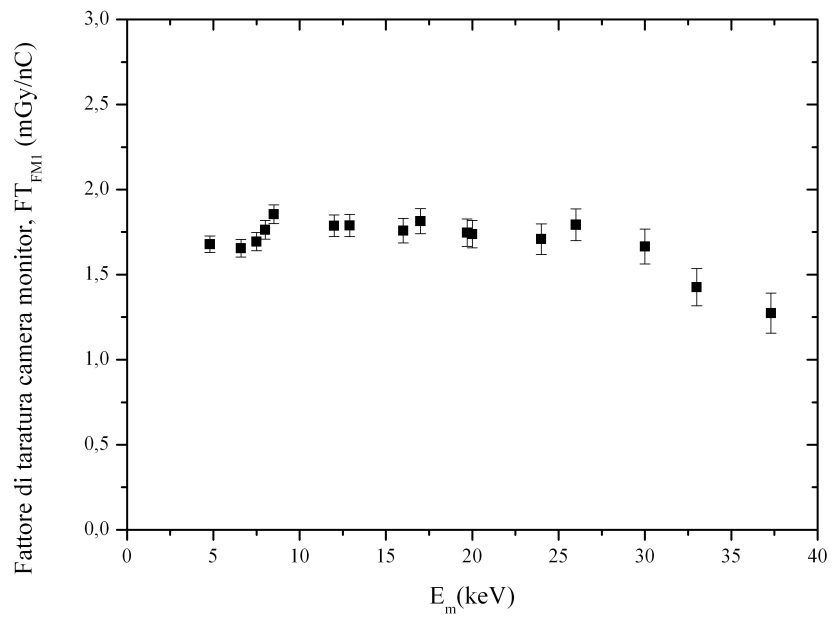


Figura 3.8: *Curva di dipendenza dall'energia della camera monitor (FM1).*

Capitolo 4

Determinazione dei dati caratteristici dei fasci ISO 4037-1 di bassa energia con il metodo dosimetrico

4.1 Introduzione

In un tubo a raggi X, le grandezze che lo caratterizzano sono: la differenza di potenziale applicata al tubo, la filtrazione propria del tubo (filtrazione inerente) e la filtrazione aggiuntiva, la corrente che passa nel tubo ed il Rateo di Esposizione ad una distanza prestabilita per determinate condizioni di impiego (la cosiddetta erogazione del tubo o output). La differenza di potenziale applicata al tubo e le filtrazioni sono espressioni della qualità del fascio. Alla differenza di potenziale applicata al tubo (kV) corrisponde l'energia massima dei raggi X prodotti. La distribuzione dello spettro dei raggi X è evidentemente una espressione più precisa della qualità del fascio ma è sicuramente di più complessa determinazione. La distribuzione spettrale dei raggi X è modificata da qualsiasi filtrazione e schermatura interposta sul percorso del fascio, in modo particolare nel campo delle basse energie dove anche un piccolo spessore d'aria può chiaramente modificare lo spettro. La filtrazione indurisce il fascio, nel senso che esso diventa più penetrante, ma il Rateo di Esposizione misurato ad una data distanza dal tubo diventa più debole.

La filtrazione totale del fascio è dovuta a tutti i materiali presenti tra la sorgente di radiazione (corrispondente al fuoco del tubo) ed il punto di misura. Essa è costituita dalla filtrazione inerente del tubo, dalla filtrazione addizionale, dall'eventuale spessore delle pareti della camera di controllo e dallo strato d'aria che si trova tra la finestra di uscita del tubo ed il punto di misura. Un diaframma in piombo di spessore pari a 4 mm all'uscita del tubo e due diaframmi fissi di 3 mm ai lati della camera a ionizzazione di controllo limitano le dimensioni del fascio di radiazione.

La *capacità di penetrazione* di un fascio di raggi X è descritta chiaramente dalla sua distribuzione spettrale. Un indice più pratico e di più immediata

comprensione, per caratterizzare il fascio di raggi X, è lo spessore emivalente (SEV).

In genere per differenze di potenziale applicate al tubo inferiori a 120 kV si utilizzano filtri di Alluminio e Rame; tra 120 e 300 kV anche Piombo e Stagno.

4.2 Realizzazione dei filtri per i fasci standard ISO 4037-1

La realizzazione dei fasci di riferimento per le basse energie, le cui caratteristiche sono riassunte in Tabella 4.1, avviene attraverso la selezione di combinazioni opportune fra tensioni applicate al tubo e filtri di assorbimento realizzati con rame (Cu) ed alluminio (Al), detta *filtrazione addizionale o aggiuntiva*.

Poiché l'emissione di radiazioni caratteristiche di fluorescenza può aver luogo anche da parte dei materiali che costituiscono la filtrazione fissa del fascio di radiazione X, è necessario disporre la serie dei filtri dei diversi materiali ordinati secondo il numero atomico con il filtro di numero atomico più alto posto verso la sorgente, in modo tale che ogni filtro assorba la radiazione caratteristica emessa dal filtro precedente. La radiazione caratteristica emessa dall'ultimo filtro, generalmente costituito da alluminio, ha una energia tale da essere assorbita da pochi centimetri di aria.

Le qualità delle radiazioni indicate in Tabella 4.1 fanno parte delle Radiazioni di Riferimento raccomandate dalla ISO. Tali qualità possono ritenersi rappresentative delle qualità più idonee per la taratura di strumentazioni e dosimetri nel campo delle basse energie.

Una preliminare determinazione della qualità del fascio di radiazione, per la maggior parte delle applicazioni pratiche, può essere effettuata, una volta fissata la tensione del tubo a raggi X e la filtrazione totale, a partire da misure di assorbimento. Il parametro normalmente utilizzato è lo spessore emivalente definito come lo spessore di un dato materiale che attenua il fascio di radiazione in esame fino a ridurne il Rateo di Esposizione alla metà del valore originario.

I materiali utilizzati per le filtrazioni addizionali mediante le quali sono realizzate le diverse qualità di radiazione X sono caratterizzati da un elevato grado di purezza (circa 99,9%) ed il loro spessore è noto con una accuratezza di $\pm 0,01$ mm.

Per ciascuna qualità di radiazione è importante che i fasci messi a punto abbiano gli spessori emivalenti uguali a quelli riportati dalla normativa entro il $\pm 1\%$. Le filtrazioni addizionali risultanti in corrispondenza dei suddetti SEV possono invece differire entro il $\pm 5\%$ da quelle riportate in tabella in relazione alle caratteristiche dell'impianto utilizzato.

Le misure sono state effettuate con la camera cilindrica ad aria libera (SM1) posta ad un metro di distanza dalla sorgente. A 50 cm dalla quale è stato posto un diaframma in piombo con un foro di diametro pari a 1,5 cm, maggiore della metà del diametro della parte sensibile della camera cilindrica, attaccato al quale si sono messi le diverse combinazioni di filtri impiegati per la misura del primo e secondo spessore emivalente per ogni qualità di radiazione. Nell'effettuare le misure del SEV va tenuto conto della eventuale dipendenza dall'energia della

Tabella 4.1: Caratteristiche delle radiazioni di riferimento.

CARATTERISTICHE DELLA SERIE “LOW AIR-KERMA RATE”

| L10-L30 | | | | |
|--------------------|---------------|-----------------------------|-------------|--------------|
| Qualità radiazione | Tensione (kV) | Filtrazione aggiuntiva (mm) | I° SEV (mm) | II° SEV (mm) |
| L10 | 10 | 0.3 di Al | | 0.058 Al |
| L20 | 20 | 2 di Al | | 0.42 Al |
| L30 | 30 | 0.18 di Cu | 4 di Al | 1.46 Al |

CARATTERISTICHE DELLA SERIE “NARROW SPECTRUM”

| N10-N30 | | | | |
|--------------------|---------------|-----------------------------|-------------|--------------|
| Qualità radiazione | Tensione (kV) | Filtrazione aggiuntiva (mm) | I° SEV (mm) | II° SEV (mm) |
| N10 | 10 | 0.1 di Al | 0.047 Al | 0.052 Al |
| N15 | 15 | 0.5 di Al | 0.14 Al | 0.16 Al |
| N20 | 20 | 1 di Al | 0.32 Al | 0.37 Al |
| N25 | 25 | 2 di Al | 0.66 Al | 0.73 Al |
| N30 | 30 | 4 di Al | 1.15 Al | 1.3 Al |

CARATTERISTICHE DELLA SERIE “HIGH AIR-KERMA RATE”

| H10-H30 | | | | |
|--------------------|---------------|-------------|--------------|--|
| Qualità radiazione | Tensione (kV) | I° SEV (mm) | II° SEV (mm) | |
| H10 | 10 | 0.04 di Al | | |
| H20 | 20 | 0.11 di Al | | |
| H30 | 30 | 0.35 di Al | | |

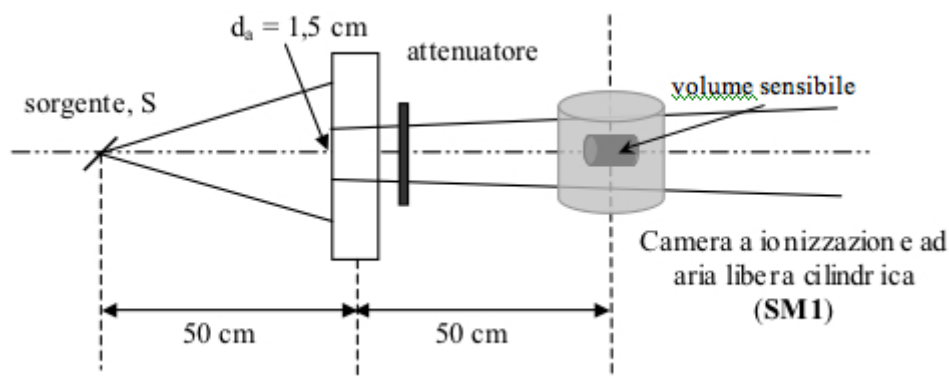


Figura 4.1: Condizioni sperimentali per la misura del SEV.

Tabella 4.2: Caratteristiche dei filtri impiegati per la misure di I° e II° SEV.

| Codice filtro ^(a) | Peso ^(b) (g) | Area (cm ²) | Spessore (mm) |
|------------------------------|----------------------------|----------------------------|------------------|
| A | 2.62382 | 100 | 0.097 |
| B | 2.62409 | 101 | 0.096 |
| C | 2.62403 | 100 | 0.097 |
| D | 2.44672 | 93 | 0.097 |
| E | 13.94118 | 101 | 0.511 |
| F | 13.57890 | 101 | 0.498 |
| G | 13.81586 | 101 | 0.507 |

^(a)densità alluminio = 2.699 g/cm³

purezza alluminio = 99.9999%

^(b)i filtri sono stati pesati con una bilancia METTLER TOLEDO (precisione 10⁻⁵)

camera (vedi Capitolo 3) a ionizzazione impiegata e, come tale dipendenza, può influire sul risultato.

E' opportuno tenere presente inoltre che la radiazione diffusa sull'attenuatore influenza il valore del SEV. Il valore misurato del SEV può infatti risultare maggiore di quello effettivo in quanto esso dipende in modo apprezzabile dal diametro del fascio sui filtri attenuatori e dalla distanza sorgente-rivelatore. Il punto in cui la radiazione diffusa risulta essere minima è a metà tra la sorgente e la camera a ionizzazione con cui si effettua la misura, è a causa di tale effetto che devono essere soddisfatte alcune condizioni relative alla geometria dell'impianto di irraggiamento (Figura 4.1).

In Tabella 4.2 sono riportati i dati caratteristici dei filtri impiegati per la misura dei SEV, la combinazione dei quali, una volta fissati tensione e filtrazione aggiuntiva, ha dato l'esatto spessore emivalente per ogni qualità di radiazione.

Una volta ottenuto il primo ed il secondo spessore emivalente come richiesto dalla normativa, impostata la tensione caratteristica di ogni fascio si ha direttamente la verifica della correttezza del filtro addizionale scelto. I valori della filtrazione aggiuntiva ottenuti sono riassunti in Tabella 4.3 per ogni qualità di radiazione.

Tabella 4.3: *Tensioni e filtrazioni aggiuntive determinate sperimentalmente da impostare per i fasci caratterizzati.***L10-L35**

| Qualità radiazione | Tensione (kV) | Filtrazione aggiuntiva determinata sperimentalmente | |
|-----------------------|------------------|--|-------------------------------|
| | | (mm) | (mm) |
| | | <u>totale</u> | <u>composizione di filtri</u> |
| L10 | 9 | 0,25 | - |
| L20 | 18,1 | 1,998 | 1+0,998 |
| L30 | 29,3 | 4,142 | 3,952 Al+0,190 Cu |
| L35 | 35 | 4,203 | 3,950 Al+0,253 Cu |

N10-N40

| Qualità | Tensione (kV) | Filtrazione aggiuntiva determinata sperimentalmente | |
|---------|------------------|--|-------------------------------|
| | | (mm) | (mm) |
| | | <u>totale</u> | <u>composizione di filtri</u> |
| N10 | 9,6 | 0,05 | 0,025+0,025 |
| N15 | 14,1 | 0,45 | - |
| N20 | 18,5 | 0,95 | - |
| N25 | 24 | 1,99 | 0,995+0,995 |
| N30 | 29 | 3,957 | |
| N40 | 40 | 4,169 | 0,216 Al+3,953 Cu |

H10-H60

| Qualità radiazione | Tensione (kV) | Filtrazione aggiuntiva determinata sperimentalmente | |
|-----------------------|------------------|--|-------------------------------|
| | | (mm) | (mm) |
| | | <u>totale</u> | <u>composizione di filtri</u> |
| H10 | 10 | - | - |
| H20 | 20 | 0,11 | - |
| H30 | 30 | 0,45 | - |
| H60 | 60 | 3,207 | - |

4.3 Misure di primo e secondo spessore emivalente (SEV)

Una volta realizzati i filtri addizionali, una ulteriore prova a conferma dell'idoneità di ogni fascio rispetto a quanto richiesto dalla normativa consiste nella misura, mediante camera a ionizzazione, del primo e secondo spessore emivalente. I risultati sono riportati in Tabella 4.4.

I dati ottenuti sono confrontabili, all'interno delle incertezze, con quanto richiesto dalla normativa.

Si è scelto di caratterizzare anche due fasci sotto i 10 keV rispettivamente a 5 keV e 7,5 keV, come estensione delle qualità di radiazioni raccomandate, in modo da avere la possibilità di ulteriori confronti con Laboratori di ricerca [12] che a loro volta hanno qualificato tali fasci.

Una volta realizzati i fasci si è misurato il Rateo di Esposizione in due diversi punti di misura con la camera a ionizzazione cilindrica (SM1) e la Kethley mod. 96035 per i fasci L35, N40 e H60 per i quali la camera standard era fuori dai range previsti per il normale impiego: 40 cm distanza sorgente-rivelatore punto utile per la taratura di camere a ionizzazione e 2 m per l'irraggiamento di dosimetri su fantoccio, punto in cui il diametro del fascio è risultato idoneo al suo impiego.

I risultati ottenuti sono riassunti per qualità del fascio in Tabella 4.5.

Tabella 4.4: Riassunto delle caratteristiche dei fasci caratterizzati mediante il metodo classico degli spessori emivalenti (metodo dosimetrico).

| Disco (n) | Filtro (p) | Radiation quality | H.T. (kV) | Max current (mA) | Additional filtrations (mm di Al) | I° HVL 1m (mm di Al) | I° HVL 2m (mm di Al) | I° HVL 2m (mm di Al) |
|--------------|---------------|----------------------|--------------|------------------------|---|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| 2 | 1 | 5 | 5 | - | - | 0.011 | - | - |
| 2 | 1 | 7.5 | 7.5 | - | - | 0.032 | - | - |
| 2 | 4 | L10 | 9 | - | 0.25 | 0.058 | 0.070 | - |
| 2 | 5 | L20 | 18.1 | - | 1.998 | 0.42 | 0.44 | - |
| 2 | 6 | L30 | 29.3 | - | 4.142 | 1.49 | 1.68 | - |
| 2 | 7 | L35 | 35 | - | 4.203 | 2.26 | 2.62 | - |

| | | | | | | | | |
|---|---|-----|------|---|-------------------|-------|-------|-------|
| 1 | 1 | N10 | 9.6 | - | 0.05 | 0.047 | 0.054 | 0.063 |
| 1 | 2 | N15 | 14.1 | - | 0.45 | 0.14 | 0.16 | 0.18 |
| 1 | 3 | N20 | 18.5 | - | 0.95 | 0.32 | 0.34 | 0.37 |
| 1 | 4 | N25 | 24 | - | 1.99 | 0.67 | 0.67 | 0.77 |
| 1 | 5 | N30 | 29 | - | 3.957 | 1.15 | 1.27 | 1.25 |
| 1 | 6 | N40 | 40 | - | 0.216 di Cu+3.953 | 2.80 | 2.97 | 3.04 |

| | | | | | | | | |
|---|---|-----|----|----|-------|------|-------|-------|
| 2 | 1 | H10 | 10 | ≤2 | - | 0.04 | 0.048 | 0.065 |
| 2 | 2 | H20 | 20 | ≤2 | 0.11 | 0.12 | 0.15 | 0.192 |
| 1 | 2 | H30 | 30 | ≤2 | 0.45 | 0.36 | 0.54 | 0.59 |
| 2 | 3 | H60 | 60 | ≤2 | 3.207 | 2.4 | 3.26 | 3.32 |

Tabella 4.5: Misure di riferimento in (mGy/nC) sia per la taratura delle camere a ionizzazione (40 cm) sia per la taratura dei dosimetri (2 m). I fasci che nella prima tabella sono stati evidenziati sono quelli per cui è stato necessario impiegare una diversa camera a ionizzazione nelle misure di riferimento.

| Camera di riferimento: camera a ionizzazione ad aria libera cilindrica (SAD) | | | | | | | | | |
|--|---------------------------|--------------------|---------------|---------------|---------------------|-------------------------|--------------------|----------------------|--------------------|
| Energia media (keV) | Energia equivalente (keV) | Qualità radiazione | tensione (kV) | corrente (nA) | tamburo/filtro (nA) | distanza 40 cm (mGy/nC) | incertezza 95% (%) | distanza 2m (mGy/nC) | incertezza 95% (%) |
| | | 5 | 5 | - | - | 1.7E-01 | 0.4% | - | - |
| | | 7.5 | 7.5 | - | - | 3.0E-01 | 0.6% | - | - |
| 8.5 | 8.5 | L10 | 9 | - | 2/4 | 5.0E-01 | 0.1% | 3.3E-03 | 0.4% |
| 17 | 17 | L20 | 18.1 | - | 2/5 | 5.9E-01 | 0.1% | 1.5E-02 | 0.1% |
| 26 | 26 | L30 | 29.3 | - | 2/6 | 5.8E-01 | 0.0% | 1.7E-02 | 0.0% |
| 30 | 30 | L35 | 35 | - | 2/7 | 5.6E-01 | 0.1% | 2.0E+00 | 0.1% |
| | | | | | | | | | |
| 8 | | N10 | 9.6 | - | 1/1 | 4.3E-01 | 0.9% | 1.7E-03 | 0.6% |
| 12 | 12 | N15 | 14.1 | - | 1/2 | 5.5E-01 | 0.3% | 8.8E-03 | 0.2% |
| 16 | 15 | N20 | 18.5 | - | 1/3 | 5.7E-01 | 0.2% | 1.3E-02 | 0.2% |
| 20 | 19 | N25 | 24 | - | 1/4 | 5.7E-01 | 0.1% | 1.5E-02 | 0.6% |
| 24 | 23 | N30 | 29 | - | 1/5 | 5.6E-01 | 0.1% | 1.6E-02 | 0.1% |
| 33 | 31 | N40 | 40 | - | 1/6 | 5.4E-01 | 0.1% | 1.9E-02 | 0.1% |
| | | | | | | | | | |
| 7.5 | | H10 | 10 | ≤ 2 | 2/1 | 3.5E-01 | 0.3% | 9.9E-04 | 0.0% |
| 12.9 | 11 | H20 | 20 | ≤ 2 | 2/2 | 5.3E-01 | 0.5% | 6.5E-03 | 0.5% |
| 19.7 | 16 | H30 | 30 | ≤ 2 | 1/2 | 5.7E-01 | 0.4% | 1.2E-02 | 0.3% |
| 37.3 | 31 | H60 | 60 | ≤ 2 | 2/3 | 5.2E-01 | 0.5% | 2.0E-02 | 0.5% |
| | | | | | | | | | |
| 30* | 30 | L35 | 35 | - | 2/7 | 5.3E-01 | 0.0% | 2.2E+00 | 0.0% |
| 33** | 31 | N40 | 40 | - | 1/6 | 5.4E-01 | 0.1% | 2.1E-02 | 0.5% |
| 37.3* | 31 | H60 | 60 | - | 2/3 | 5.3E-01 | 0.1% | 2.0E-02 | 0.1% |

* Camera di riferimento: Keithley mod. 96035

Capitolo 5

Caratteristiche nominali dei campi di irraggiamento e grandezze dosimetriche associate

5.1 Grandezze fisiche in radiometria

Il modo più semplice per descrivere un campo di radiazioni è quello di contare punto per punto il numero di particelle presenti nello spazio delle fasi (spazio geometrico, energia). Ciò è legato al concetto di fluenza di particelle.

Si definisce fluenza di particelle in un certo punto di un mezzo materiale irraggiato e si indica con il simbolo Φ la quantità:

$$\Phi = \frac{dN}{da} \quad (5.1)$$

dove dN rappresenta il numero di particelle incidenti su di una sfera di sezione massima da avente centro nel punto considerato.

Nell'indicare con dN il numero di particelle che attraversa l'area da si deve pensare questa sempre perpendicolare alla direzione di incidenza delle particelle.

La 5.1 presenta la notazione differenziale in quanto la definizione deve potersi applicare anche nel caso di campi non uniformi nei quali la fluenza varia da punto a punto. A causa della natura statistica propria dei campi di radiazione, le variabili con le quali si tratta sono sempre di tipo casuale. Tale è anche il numero di particelle N il cui differenziale dN deve intendersi come differenziale del numero medio atteso di particelle.

La fluenza di particelle si esprime nel SI in m^{-2} .

In molte occasioni è di maggiore interesse conoscere l'energia totale trasportata in una certa regione. Facendo uso dell'energia radiante R che coincide con l'energia delle particelle emessa, trasferita e ricevuta, il trasporto dell'energia della radiazione nello spazio può essere allora descritto mediante la fluenza di energie delle particelle ψ

$$\psi = \frac{dR}{da} \quad (5.2)$$

dove dR è l'energia radiante incidente su una sfera infinitesima di sezione massima da centrata nel punto considerato. La fluenza di energia si misura nel SI in $J \cdot m^2$.

Le distribuzioni differenziali di fluenza (o spettri) di particelle e di fluenza di energia sono definite rispettivamente come

$$\Phi_E = \frac{d\Phi(E)}{dE} \quad (5.3)$$

$$\psi_E = \frac{d\psi(E)}{dE} \quad (5.4)$$

dove con Φ_E e ψ_E si intendono rispettivamente la fluenza di particelle e la fluenza di energia relative a particelle di energia cinetica non superiore ad E .

Le due grandezze introdotte sono legate dalla seguente relazione

$$\psi_E = E \cdot \Phi_E \quad (5.5)$$

E' utile calcolare l'energia media delle particelle presenti, pesando la media sia sulla fluenza di particelle che sulla fluenza di energia

$$\bar{E}_\Phi = \frac{\int_0^{E_{max}} E \cdot \Phi_E dE}{\int_0^{E_{max}} \Phi_E dE} \quad (5.6)$$

$$\bar{E}_\psi = \frac{\int_0^{E_{max}} E \cdot \psi_E dE}{\int_0^{E_{max}} \psi_E dE} \quad (5.7)$$

dove gli integrali che compaiono nella 5.6 e nella 5.7 sono estesi a tutte le possibili energie e i loro valori coincidono rispettivamente con la fluenza di particelle e con la fluenza di energie totali.

5.2 Dipendenza degli spettri fotonici di bassa energia dalla distanza sorgente-rivelatore

Nei capitoli precedenti sono stati approfonditi in modo dettagliato tutti i parametri in gioco che garantiscono una elevata stabilità della fluenza energetica dei fasci a raggi X generati dall'impianto da caratterizzare. Oltre ad una analisi delle diverse caratteristiche dell'impianto, nel campo delle basse energie, è di fondamentale importanza tenere monitorati anche i parametri ambientali quali temperatura, pressione ed umidità: infatti in questo dominio di energie fotoniche particolarmente basse, piccole variazioni dei parametri testé citati possono avere una significativa influenza sulle distribuzioni spettrali dei fotoni. Di particolare criticità è lo spessore dell'aria, cioè la distanza tra la sorgente di radiazione (intesa come fuoco del tubo a raggi X) ed il punto di misura [57].

Allo scopo di analizzare l'influenza dello spessore di aria tra sorgente e punto di misura sullo spettro, è stata fatta una campagna parametrica (in funzione dello spessore) di calcoli Monte Carlo di spettro in aria. Gli spettri in fluenza, $\phi(E)$, utilizzati sono stati misurati in due Laboratori primari europei e sono

definiti a 100 cm e 250 cm dalla sorgente di radiazione [12, 7]. Per ottenere la distribuzione in fluena dei fotoni emessi alla sorgente è stata applicata agli spettri a 100 cm, canale per canale, l'inverso della legge di attenuazione esponenziale¹ in base allo spessore di aria considerato. Per ogni spettro e distanza è stato calcolato il valore di kerma in aria associato alla fluena totale, $\frac{K_a}{\phi}$, con il rispettivo coefficiente di conversione per unità di fluena. Le distanze considerate sono: 40 cm, 50 cm, 60 cm, 80 cm, 100 cm, 150 cm e 200 cm. Al fine di rendere immediato il confronto, ogni spettro è stato normalizzato allo spettro a 40 cm (imposta area =1) rispettivamente per ogni famiglia di radiazione (da Fig.5.1 a Fig.5.10).

Osservando gli spettri è evidente come allontanandosi dalla sorgente ci sia un *indurimento* dello spettro, inteso come diminuzione della componente di bassa energia. Questo fenomeno è però evidente solo per fasci a più bassa energia come L10, L20, N10, N15, N20, H20, cioè per $E \lesssim 20$ keV. Infatti all'aumentare dell'energia media dello spettro l'influenza dello spessore d'aria sulla distribuzione spettrale diminuisce notevolmente lasciando la forma dello spettro pressochè invariato.

5.3 Grandezze operative: definizioni

L'ICRU (International Commission on Radiological Units and Measurements) dal 1925 svolge la sua attività, con il principale obiettivo di stabilire raccomandazioni internazionalmente accettate riguardanti le quantità e le unità da adottare per la misura della radiazione e della radioattività, e di identificare procedure adatte per la misura delle quantità proposte in diverse discipline tra le quali la radioprotezione.

In quest'ultimo campo il suo lavoro si svolge in stretta collaborazione con la Commissione Internazionale di Radioprotezione (ICRP).

La validità di una grandezza operativa in radioprotezione è commisurata al grado con cui essa soddisfa determinate caratteristiche. La scelta dell'ICRU è stata fatta, oltre che sulla base della possibilità che sia riferibile ad uno standard di taratura primario, anche in relazione alla sua applicabilità come buona stima dei limiti protezionistici. Inoltre si è tenuta ben presente la necessità di individuare due tipi di grandezze operative, un tipo da usare nel caso di radiazioni fortemente penetranti e l'altro tipo da usare con radiazioni debolmente penetranti.

La scelta della quantità operativa proposta è anche legata alle diverse condizioni reali nelle quali si usa. Nella pratica si verificano due situazioni possibili, in un caso il dosimetro è a contatto con il mezzo o la persona a cui si intende riferire la misura, nell'altro il dosimetro può effettuare la misura in un ambiente in assenza del corpo a cui si vuole riferire la misura stessa.

Alla luce delle precedenti considerazioni, le grandezze operative proposte

$$^1 I(E) = I_0(E) \cdot \exp(-(\mu/\rho)_{aria} \cdot \rho_{aria} \cdot x)$$

dove $I_0(E)$ è la fluena dei fotoni emessi alla sorgente (valore incognito); $I(E)$ è la fluena dei fotoni alla distanza x dalla sorgente; x è pari a 100 cm; $(\mu/\rho)_{aria}$ è il coefficiente di assorbimento massico dell'aria e ρ_{aria} è la densità dell'aria pari a $1,2050 \cdot 10^{-3}$ g/cm³.

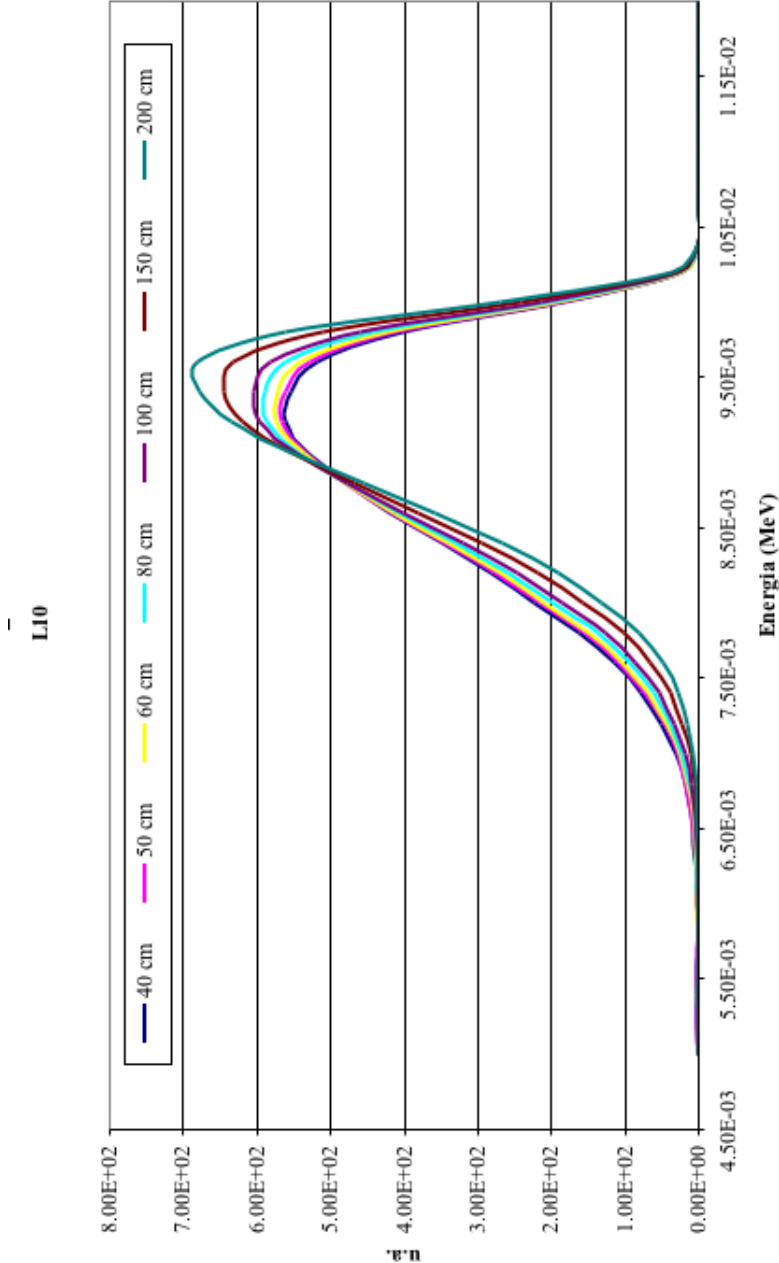


Figura 5.1: Spettro *L10*.

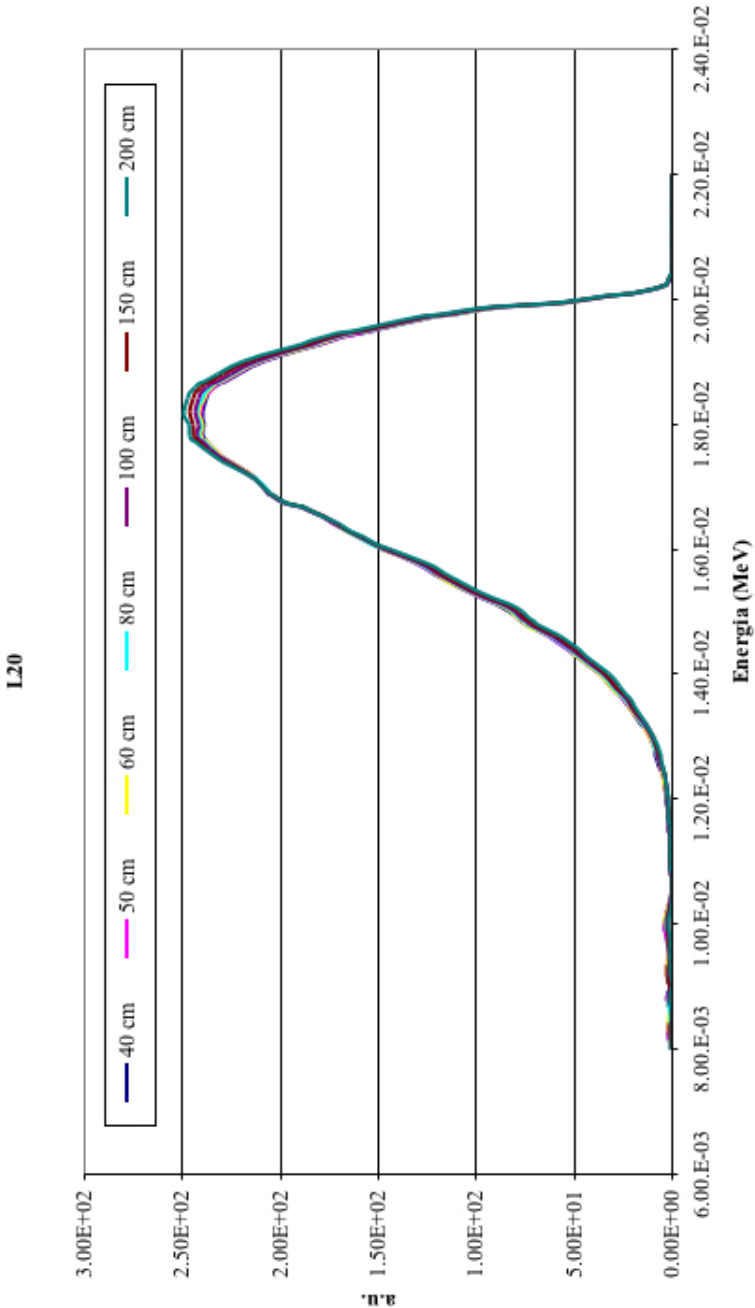


Figura 5.2: Spettro L20.

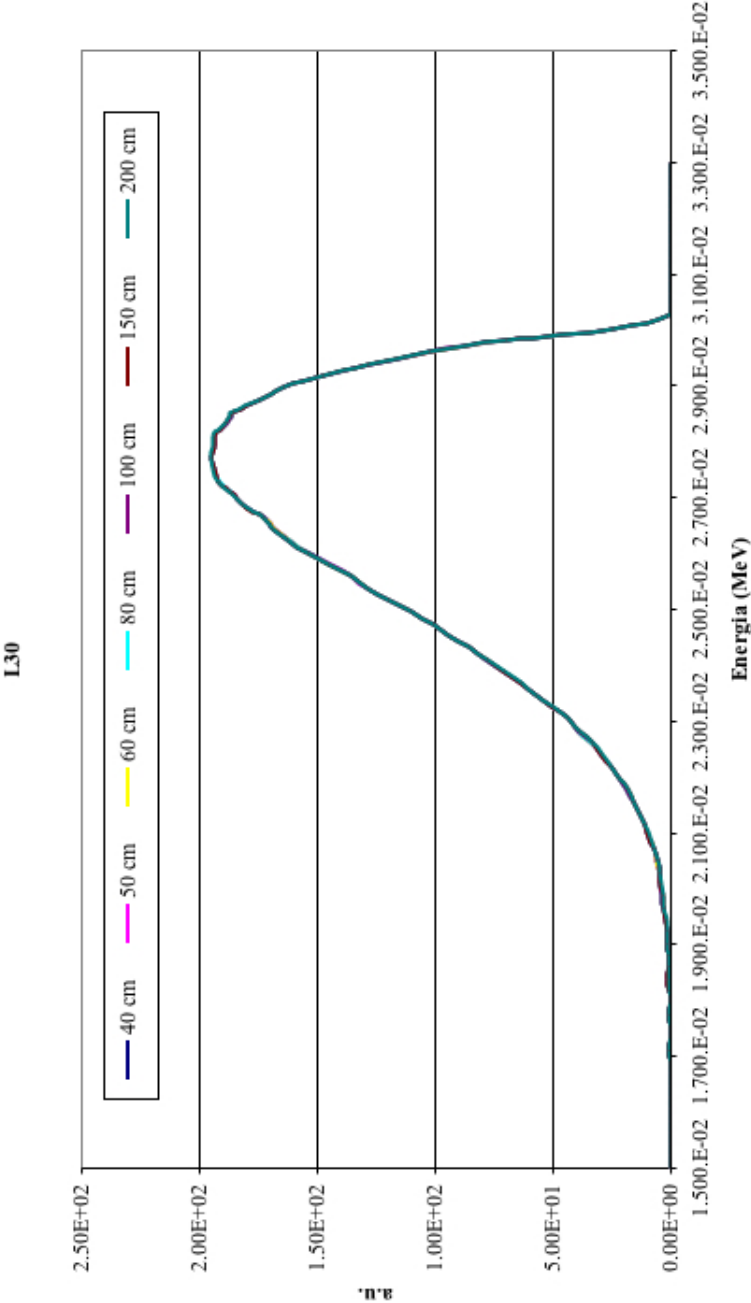


Figura 5.3: Spettro *L30*.

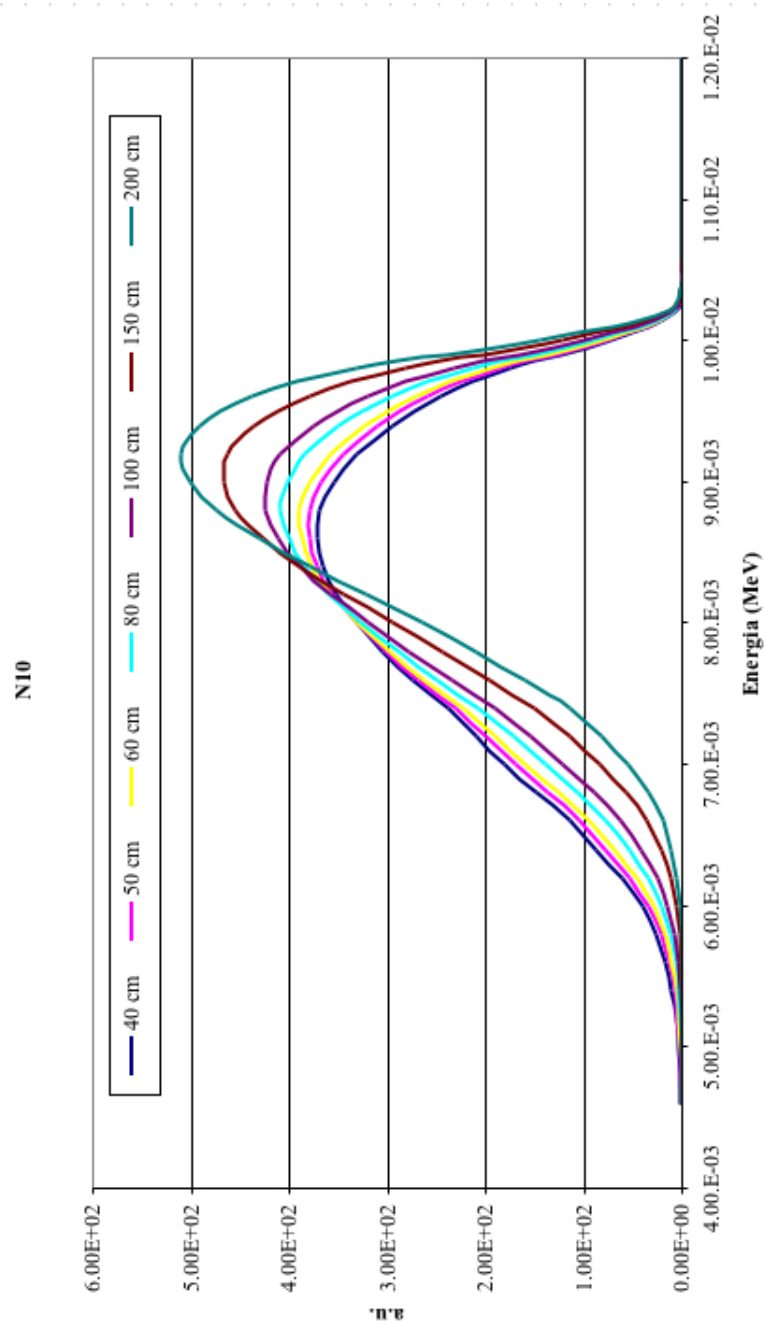


Figura 5.4: Spettro N10.

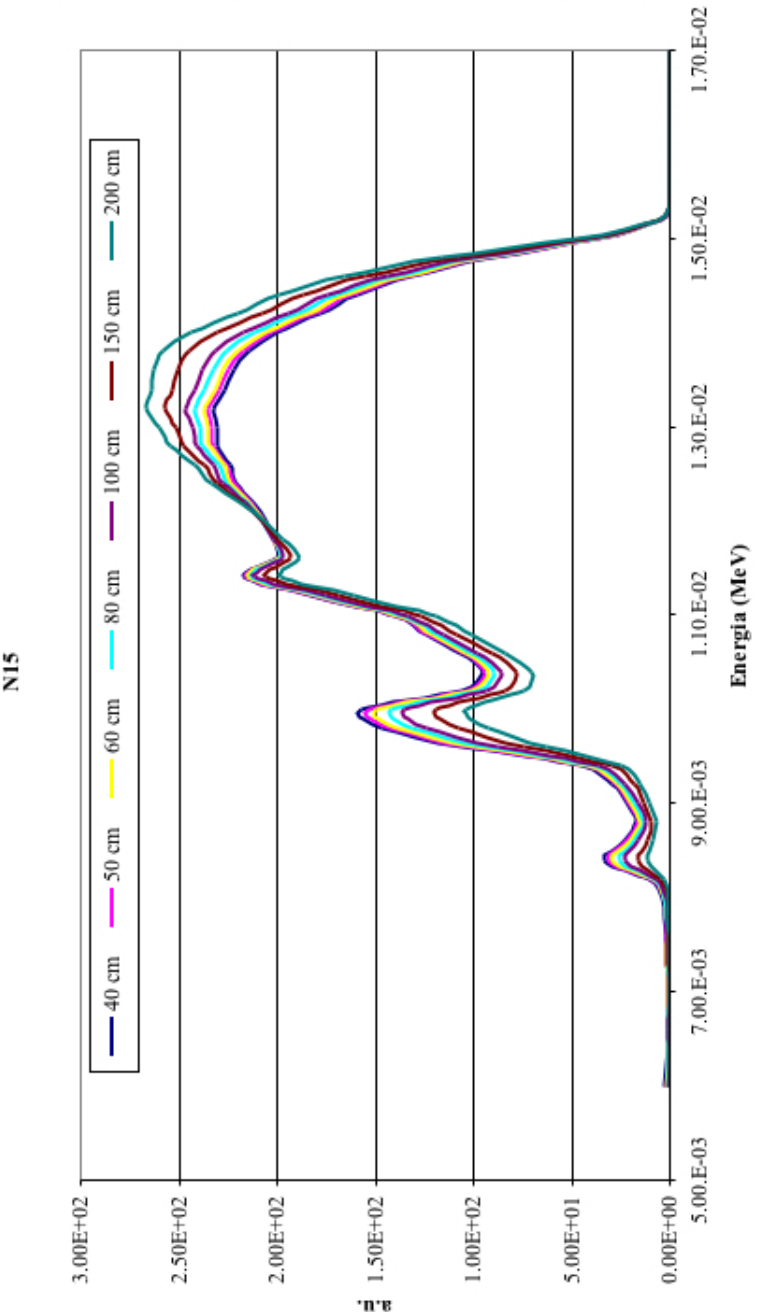


Figura 5.5: Spettro N15.

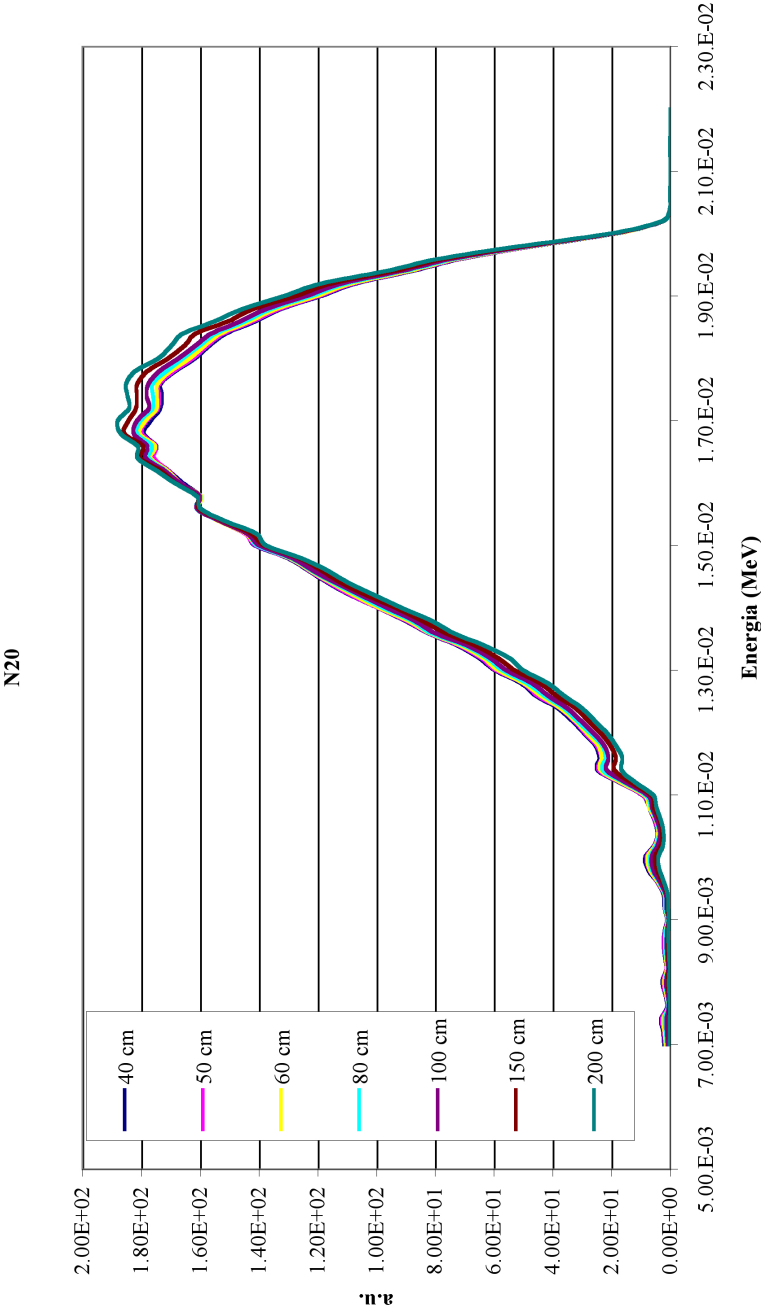


Figura 5.6: Spettro N20.

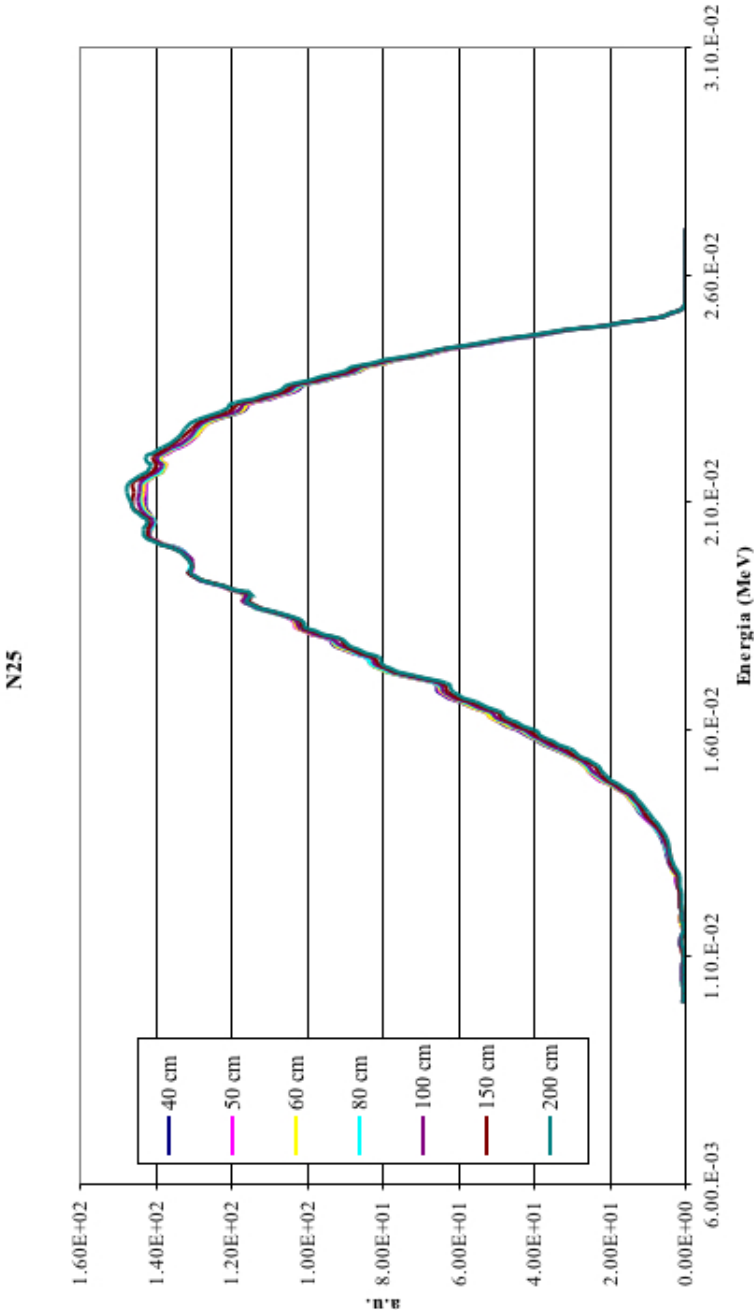


Figura 5.7: Spettro N25.

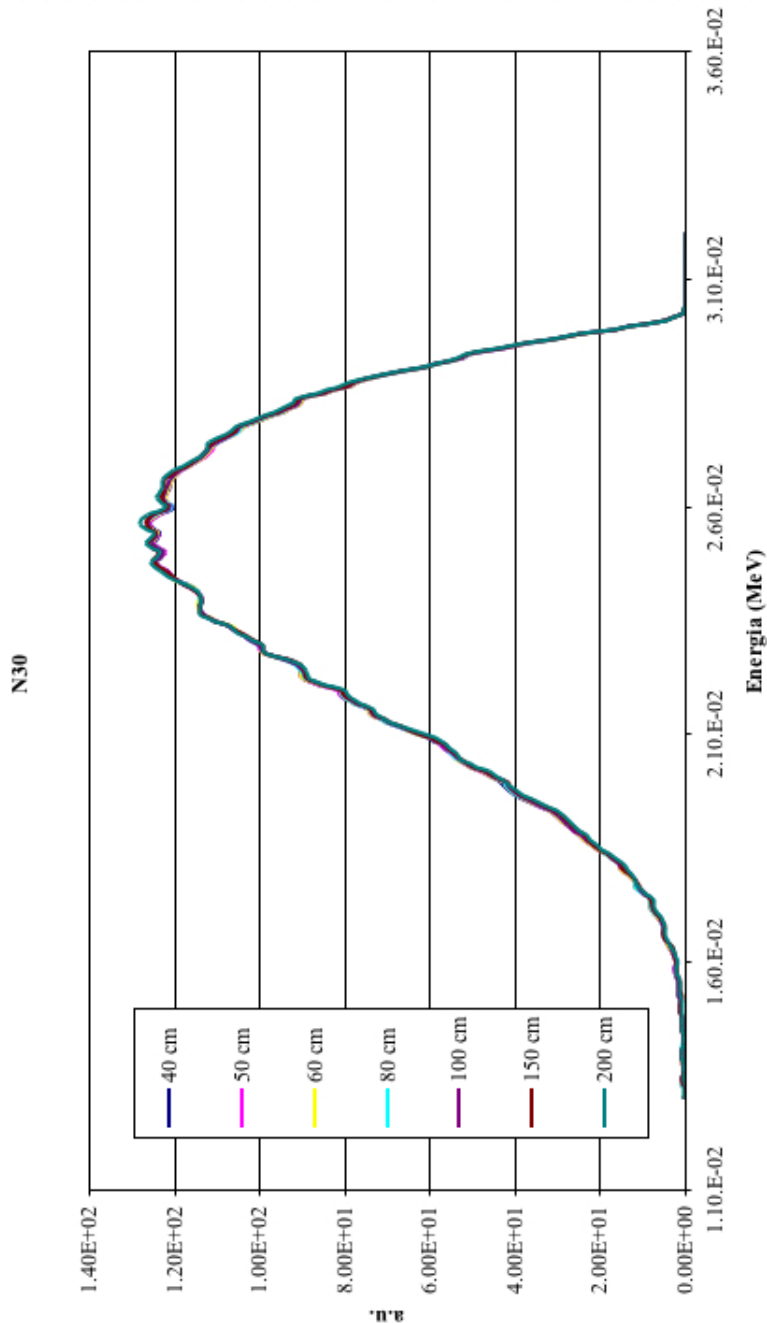
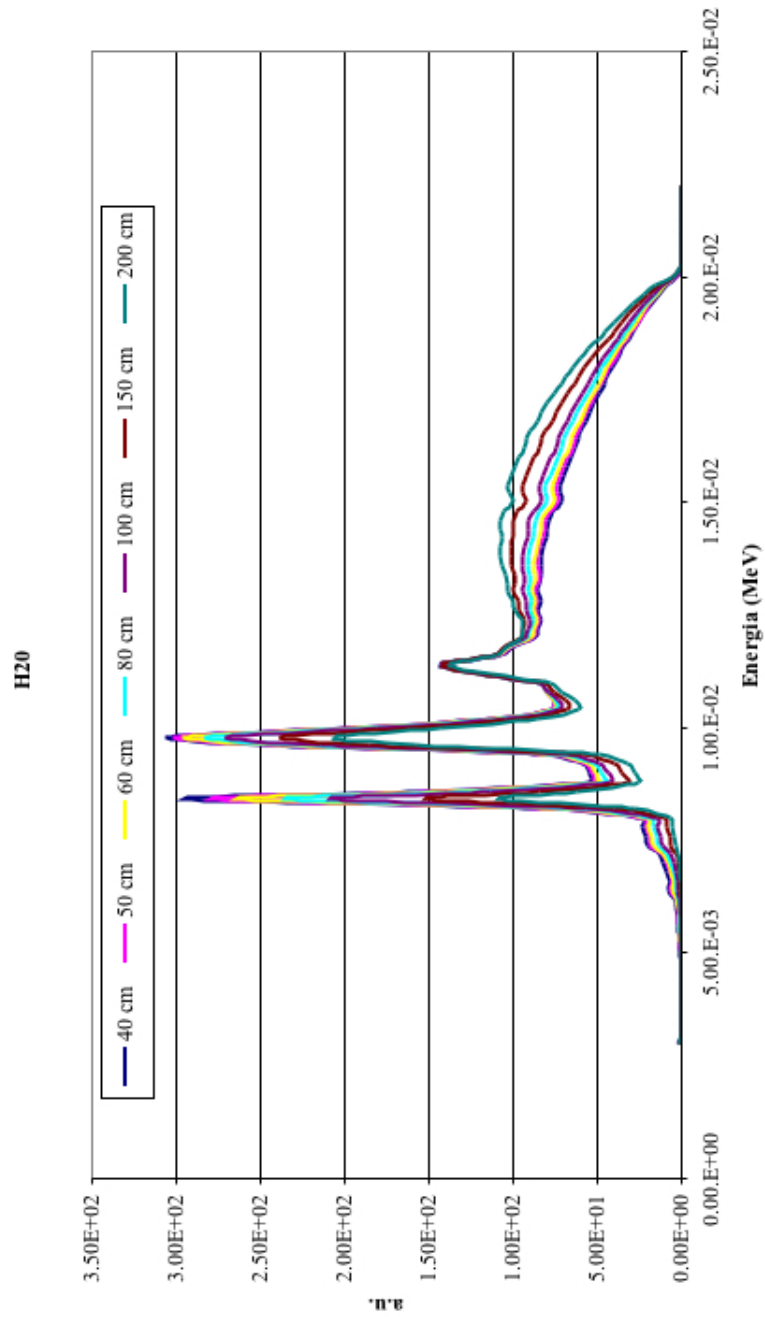
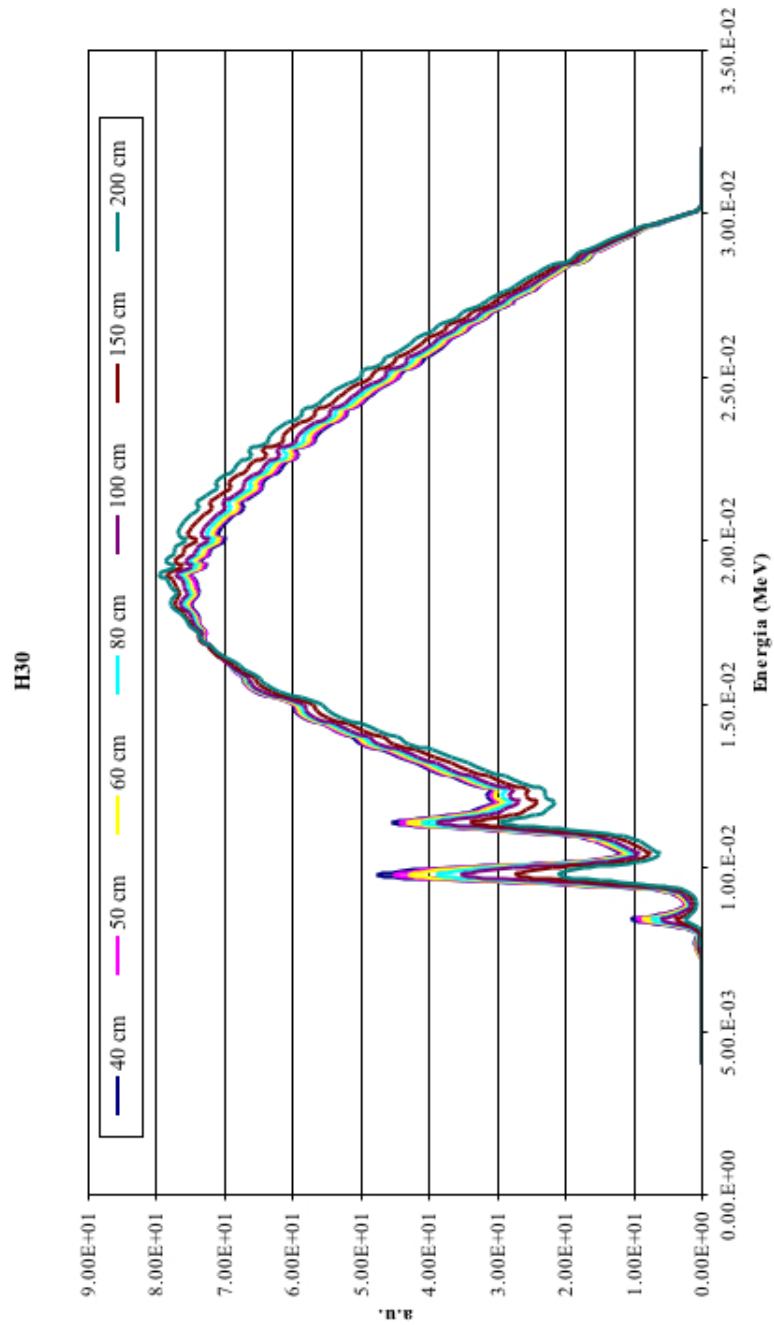


Figura 5.8: Spettro *N30*.

Figura 5.9: Spettro H_{20} .

Figura 5.10: *Spettro H30.*

dall'ICRU per il controllo dell'irradiazione esterna, sono state innanzitutto suddivise in due categorie, rispettivamente al monitoraggio ambientale ed al monitoraggio individuale.

1. Le misure radioprotezionistiche in ambienti come le zone controllate o sorvegliate vengono effettuate per fornire una informazione a priori o a posteriori sul valore della dose equivalente assorbita da una persona che potrebbe trovarsi in quella zona. L'informazione fornita dalla misura deve perciò essere tale da consentire la conoscenza della dose equivalente che si avrebbe in quel dato campo di radiazione con la persona presente. E' noto infatti che la presenza della persona modifica in modo apprezzabile le caratteristiche del campo di radiazione esistente nella zona occupata. E' necessario quindi misurare una grandezza che sia definita in appropriati punti all'interno di un recettore adatto.

A tale riguardo l'ICRU raccomanda come fantoccio una sfera di 30 cm di diametro (sfera ICRU) di materiale equivalente al tessuto molle composto da 10,1% di idrogeno, 11,1% di carbonio, 2,6% di ossigeno e 76,2% di azoto, dove i componenti sono dati come frazione di densità atomica. La somma di queste dà l'effettiva densità del materiale teorico (1 g/cm^3).

La definizione delle grandezze raccomandate per il monitoraggio ambientale, richiede qualche precisazione preliminare riguardo al significato di alcuni termini.

Con la notazione di *campo espanso* si intende il campo di radiazione avente per tutto il volume di interesse, (la sfera ICRU), la stessa fluena di particelle, la stessa distribuzione angolare e la stessa distribuzione di energia del campo effettivamente presente nel punto di riferimento.

Si parlerà invece di *campo allineato ed espanso* quando, nel volume di interesse, si mantengono inalterate la fluena di particelle, mentre la distribuzione angolare del campo di radiazione viene assunta unidirezionale (allineamento).

Ciò premesso l'ICRU propone per scopi di monitoraggio ambientale l'*equivalente di dose ambiente*, $H^*(d)$ e l'*equivalente di dose direzionale*, $H'(d)$.

La quantità $H^*(10)$, è definita come l'equivalente di dose in un punto del campo di radiazione che sarebbe prodotta dal corrispondente campo allineato ed espanso nella sfera ICRU alla profondità di 10 mm, sul raggio della sfera situato nella direzione opposta a quella del campo allineato. Il valore di $H^*(10)$ risulta quindi indipendente dalla distribuzione angolare della radiazione incidente. Il sistema di rivelazione deve quindi essere isotropo.

La quantità $H'(0,07; \vec{\Omega})$ è definita come l'equivalente di dose direzionale in un punto di un campo di radiazione che sarebbe prodotta dal corrispondente campo espanso nella sfera ICRU alla profondità di 0,07 mm, lungo un raggio della sfera situato in una specifica direzione. L'equivalente di dose direzionale è previsto per radiazioni debolmente penetranti per le quali non sarebbe corretto non considerare l'attenuazione che comporta una sovrastima dell'equivalente di dose agli organi superficiali. La grandezza $H'(0,07; \vec{\Omega})$, definita nella sfera ICRU per un campo di radiazioni soltanto espanso, a differenza di $H^*(10)$, viene a dipendere dalla distribuzione angolare della radiazione incidente. In particolare il valore di $H'(0,07; \vec{\Omega})$ decresce all'aumentare dell'angolo della radiazione rispetto alla direzione di riferimento.

Tabella 5.1: *Fantocci di riferimento secondo le raccomandazioni ISO.*

| Fantoccio di riferimento | Fantoccio ISO |
|--|---|
| Parallelepipedo 30 cm x 30 cm x 15 cm di tessuto ICRU (per corpo intero) | Parallelepipedo 30 cm x 30 cm x 15 cm di H ₂ O con parete frontale di 0,25 cm di PMMA e le restanti di 1 cm di PMMA |
| Cilindro Ø 7,3 cm x 30 cm di tessuto ICRU (per polso e caviglia) | Cilindro Ø 7,3 cm x 30 cm di H ₂ O con parete circolare di 0,25 cm di PMMA e basi di 1 cm di PMMA |
| Cilindro Ø 1,9 cm x 30 cm di tessuto ICRU (per dito) | Cilindro Ø 1,9 cm x 30 cm di PMMA |

2. La grandezza operativa di riferimento per la dosimetria individuale è l'*Equivalente di Dose Personale*, $H_p(d)$, appropriata per radiazioni fortemente e debolmente penetranti, ed è definita come:

$H_p(d)$ = equivalente di dose in tessuto molle ad una profondità d sotto uno specificato punto del corpo.

L'equivalente di dose individuale $H_p(d)$ deve includere la specificazione della profondità di riferimento (espressa in mm). Le profondità raccomandate per radiazioni debolmente penetranti sono 0,07 mm per la pelle e 3 mm per il cristallino, mentre 10 mm è la profondità raccomandata per radiazioni fortemente penetranti per il corpo intero.

L'equivalente di dose personale, $H_p(d)$, non è misurabile nel corpo, dove è definito, pertanto è stato introdotto un fantoccio a slab $30 \times 30 \times 15 \text{ cm}^3$ tessuto equivalente ICRU (76.2% O, 11,1% C, 10.1% H, 2.6% N) che simula il tronco del corpo. Nel caso della dosimetria per estremità sono stati introdotti fantocci cilindrici di dimensioni opportune per la simulazione delle dita delle mani e del polso. I valori di $H_p(d)$ si determinano attraverso la "conversione" di valori misurabili di k_a o Φ , con fattori di conversione calcolati con metodi Monte Carlo, con cui viene valutata la distribuzione di dose alle varie profondità stabilite nei fantocci di tipo teorico appropriati (Tabella 5.1).

5.4 Grandezze operative per la dosimetria individuale: problematiche legate alle basse energie

Per spettri a raggi X con tensioni inferiori a 30 kV ed in particolare in quegli spettri in cui sono presenti picchi caratteristici, il contributo predominante alla grandezza kerma in aria è dato dalla componente di più bassa energia [57]. Viceversa, il valore di equivalente di dose personale o ambientale ad una profondità di 10 mm, $H_p(10)$, è determinato dalla parte dello spettro ad alta energia. Di conseguenza, il valore del coefficiente di conversione tra queste due grandezze dipende in modo critico dall'esatta forma dello spettro incidente sul punto di calibrazione. L'applicazione dei coefficienti di conversione standard per tipologia di spettro potrebbe portare ad una errata calibrazione, in quanto lo spettro ad un ipotetico punto di calibrazione potrebbe non essere necessariamente identico a quello usato nella determinazione dei coefficienti di conversione stessi. La maggiore discrepanza fra i valori di $\frac{H_p}{k_a}$ tabulati in letteratura e quelli calcolati

nelle condizioni reali di impiego è riscontrato per spettri di fasci X filtrati con tensioni inferiori a 10 kV, per i quali anche un metro di aria tra la sorgente ed il punto di calibrazione può causare un aumento del 100% nel valore del coefficiente di conversione. E' nella norma invece, per spettri di energie medie superiori, riscontrare, nei valori dei coefficienti di conversione, variazioni dell'ordine del 5% da attribuirsi alle tensioni applicate, alla filtrazione addizionale e non ultimo alle possibili fluttuazioni della densità dell'aria, funzione della temperatura e pressione.

Nelle pubblicazioni ICRP 74, nei rapporti ICRU 57 e ICRU 51 [14] e nella ISO 4037-3 [5] sono tabulate le serie dei coefficienti di conversione monoenergetici da kerma in aria alle grandezze operazionali $H_p(d,E)/k_a$, ambientali e direzionali $H^*(10,E)/k_a$, e $H'(0,07,E)/k_a$, per energie superiori a 10 keV. Gli spettri, impiegati nella determinazione dell'influenza sulla distribuzione spettrale dello spessore di aria sono stati usati successivamente per ottenere i coefficienti di conversione da kerma in aria alle grandezze operative, ambientale e direzionali per energie inferiori a 10 keV, necessari per la determinazione degli stessi sugli spettri ricostruiti.

Il calcolo dei coefficienti di conversione può essere effettuato soltanto per mezzo di simulazioni Monte Carlo che consentono una rappresentazione dettagliata sia del fantoccio (corpo umano, sfera ICRU o eventuali altri fantocci semplificati) che delle relative condizioni di irraggiamento.

In questo caso, in accordo con le raccomandazioni ICRU, è stato simulato un fantoccio a slab teorico-4 elementi $30 \times 30 \times 15 \text{ cm}^3$ con fotoni di energia $E_{ph} = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9$ e 10 keV ed angoli $\alpha = 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ, 45^\circ, 50^\circ, 60^\circ, 70^\circ$ e 80° .

Considerando che in letteratura sono riportati i coefficienti di conversione monoenergetici per energie superiori a 10 keV, i calcoli Monte Carlo hanno permesso di ottenere i valori di equivalente di dose personale per unità di fluenza, $\frac{H_p}{\phi}$.

Come è ben visibile in figura 5.11, alle energie sotto i 20 keV la pendenza della curva che descrive il coefficiente di conversione $\frac{H_p}{k_a}$ è molto pronunciata. Perciò un piccolo cambiamento nello spettro dei fotoni (ad esempio causato da un diverso spessore di aria interposto) può comportare una significativa variazione nel coefficiente associato al fascio in esame.

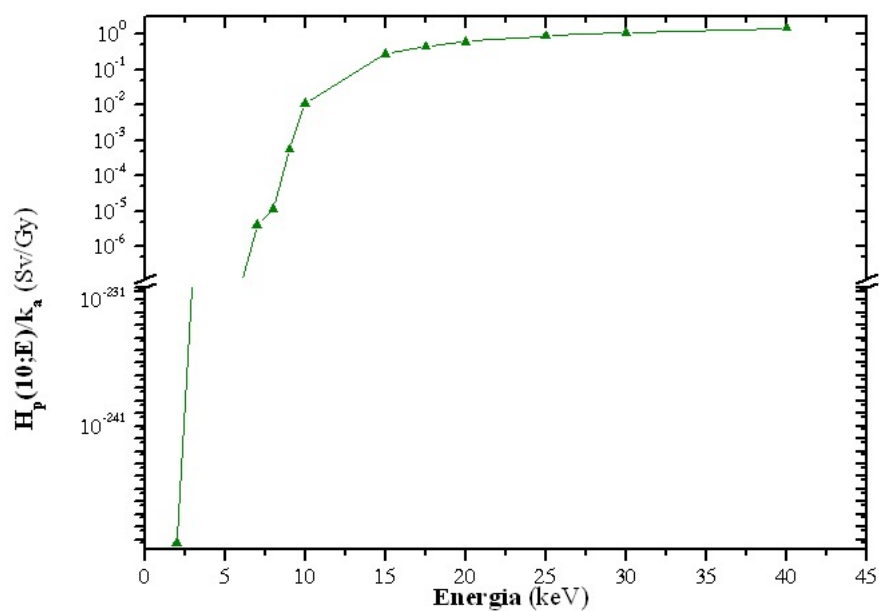


Figura 5.11: Andamento del coefficiente di conversione monoenergetico in aria $H_p(10;E)/k_a$ in Sv/Gy.

Capitolo 6

Qualificazione della catena spettrometrica

6.1 Introduzione

In questo capitolo è discussa la qualificazione della catena spettrometrica, in modo particolare è dato rilievo allo studio effettuato mediante simulazione numerica per determinare la curva di efficienza del rivelatore.

La curva di efficienza di un rivelatore al germanio può infatti essere determinata, per una geometria specifica ed un intervallo di energia fissato, sia sperimentalmente, usando sorgenti standard di calibrazione, sia mediante simulazioni numeriche.

Nel campo della metrologia di bassa energia risulta però essere molto difficile ottenere buoni risultati sperimentalmente nella determinazione di tale curva, in quanto la variazione dell'efficienza in funzione dell'energia è molto elevata.

E' stato quindi necessaria una modellazione del rivelatore nelle reali condizioni di impiego ed una analisi parametrica per conoscere l'esatto spessore dello strato morto (*dead layer*) non trascurabile per tali energie e generalmente non fornito dalla casa costruttrice [41].

6.2 La catena di acquisizione

La catena spettrometrica utilizzata è composta da: un rivelatore al germanio iperpuro (HPGe) di tipo Ultra LEGE (Ultra Low Energy GERmanium) completo di preamplificatore e di un elaboratore digitale di segnali (Digital Signal Processor, DSP) detto DSA-1000 che sostituisce l'accoppiata amplificatore - convertitore analogico digitale (Analog to Digital Converter - ADC) al fine di ridurre tempi di raccolta altrimenti lunghi ed ottimizzare l'elaborazione degli impulsi.

L'unità DSA-1000 rappresenta una innovazione nel settore della spettrometria gamma: essa infatti realizza la digitalizzazione del segnale in uscita dal preamplificatore con un ADC molto veloce. Il segnale digitalizzato viene poi elaborato dal processore DSP con una funzione trapezoidale simmetrica e

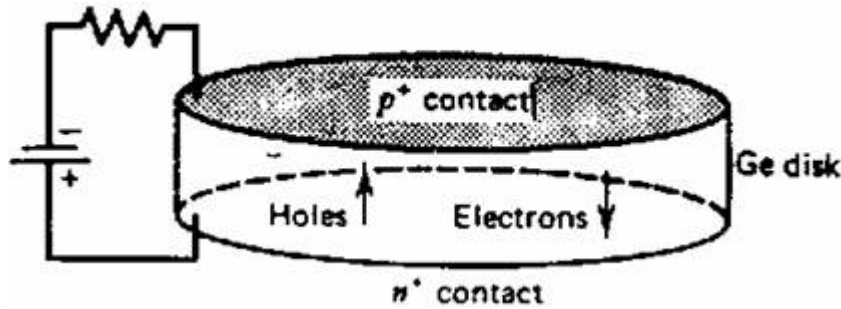


Figura 6.1: Rivelatore al Ge di tipo planare.

quasi-ideale. L'adozione della funzione trapezoidale implica minor tempo di elaborazione rispetto quella semi-gaussiana a parità di risoluzione (oppure consente migliore risoluzione a parità di tempo di elaborazione). Ciò permette un minore tempo morto, minore *pile-up* e più conteggi, oppure maggiore risoluzione.

La messa a punto dello spettrometro ha costituito una significativa parte del lavoro in quanto le condizioni in cui viene effettuata la misura ed il dominio energetico considerato comportano numerosi problemi sia di posizionamento, di centratura del rivelatore rispetto al fascio di radiazione ed al banco ottico sia di scelta degli opportuni diaframmi al fine di eliminare problemi di saturazione del rivelatore a causa degli alti ratei.

La dinamica del DSP è stata fissata a 2048 canali con una amplificazione regolata in modo da ottenere una conversione di 30 eV/canale circa e visualizzare sullo spettro l'intervallo energetico di interesse comprendente, ovviamente, le energie di emissione gamma dei radionuclidi impiegati nella calibrazione in energia ed efficienza del rivelatore. L'intervallo energetico totale ottenuto risulta compreso tra 0 e 60 keV, sufficientemente ampio per visualizzare gli spettri considerati.

Sono stati inoltre considerati il tempo di formazione dell'impulso (*shaping time*), la regolazione di cancellazione automatica di polo-zero ed il ripristino della linea di base di picco (*baseline restore*) in quanto non esistono procedure standard da seguire che impongano valori o intervalli precisi di impostazione dei suddetti parametri.

6.3 Il rivelatore al Germanio iperpuro (HPGe)

I rivelatori al germanio iperpuro (HPGe) sono rivelatori a semiconduttore di produzione relativamente recente. L'inconveniente di questo tipo di rivelatore riguarda l'alto grado di purezza necessario al suo funzionamento. Attualmente si è riusciti a realizzare cristalli con bassissime concentrazioni di impurezze (fino a 10^8 atomi/cm³) tali da ottenere una buona zona di svuotamento (*depletion layer*). Un rivelatore a Ge del tipo planare, si può ottenere a forma di disco, come mostrato in Figura 6.1.

Su di uno strato di Ge-n viene generata una barriera di potenziale attraverso

un contatto con un materiale di tipo p. La barriera viene polarizzata in modo inverso con il generatore. Per creare all'interno del cristallo una zona compensata il più ampia possibile, è necessario applicare una tensione di polarizzazione inversa rispetto ai contatti elettrici del cristallo (n+ e p+). Il contatto n+ si crea diffondendo ioni di litio all'interno della superficie del cristallo, mentre quello p+ si ottiene impiantando ioni di boro sulla superficie del cristallo. Il processo di diffusione del litio crea una zona di spessore considerevole, pari a circa 700 μm mentre l'impianto di boro crea uno spessore di soli 0,3 μm . L'impianto di tali contatti provoca la formazione di una zona, detta strato morto (*dead layer*). L'energia depositata in questa regione dalla radiazione incidente non crea alcuna carica e pertanto si perde tale informazione che non contribuisce alla risposta. La determinazione dello spessore dello strato morto è stato oggetto di uno approfondito studio, in quanto, nel dominio energetico di interesse, anche uno spessore di poche decine di micron provoca una attenuazione non trascurabile della radiazione.

I rivelatori HPGe possono avere due diverse configurazioni geometriche: planari o cilindrico coassiali. In Figura 6.2 sono schematizzati alcuni rivelatori in configurazione planare e coassiale e la suddivisione degli stessi in base agli intervalli di energia di impiego. La temperatura di lavoro è approssimativamente 77 K (temperatura corrispondente all'azoto liquido usato come refrigerante).

Il rivelatore usato è un rivelatore al germanio a stato solido iperpuro di tipo Ultra LEGE in configurazione planare prodotto dalla Canberra connesso ad un piccolo criostato portatile atto a contenere l'azoto liquido necessario a raffreddare sia il cristallo di Ge sia l'elettronica costituita dal FET del preamplificatore (Figura 6.3). Il cristallo ha un diametro ed uno spessore rispettivamente di 8,5 mm e 5 mm. Sulla finestra di ingresso è presente un collimatore ad anello di Al di spessore pari a 0,5 mm e diametro di 6,5 mm. Il cristallo è montato ad una distanza di 5 mm dalla finestra di spessore pari a 25,4 μm . Le caratteristiche generali del rivelatore e criostato sono riassunte in Tabella 6.1.

Tabella 6.1: *Caratteristiche generali del rivelatore al Germanio.*

| | |
|---------------------------|--------------------------------------|
| Tipo | Ultra LEGE |
| Superficie attiva | 30 mm ² |
| Spessore | 5 mm |
| Risoluzione | 140 eV a 5,9 keV 550 eV a 122 keV |
| Finestra di berillio (Be) | 8 μm |
| Criostato portatile | Big MAC-Five Day* |

*peso: 7,9 kg (vuoto); 13,6 kg (pieno)

capacità LN₂: 7 l

durata: 5 gg

tempo di raffreddamento: 2 h

La finestra di entrata della radiazione è composta di uno strato sottile di berillio che consente di operare alle basse energie con elevata efficienza.

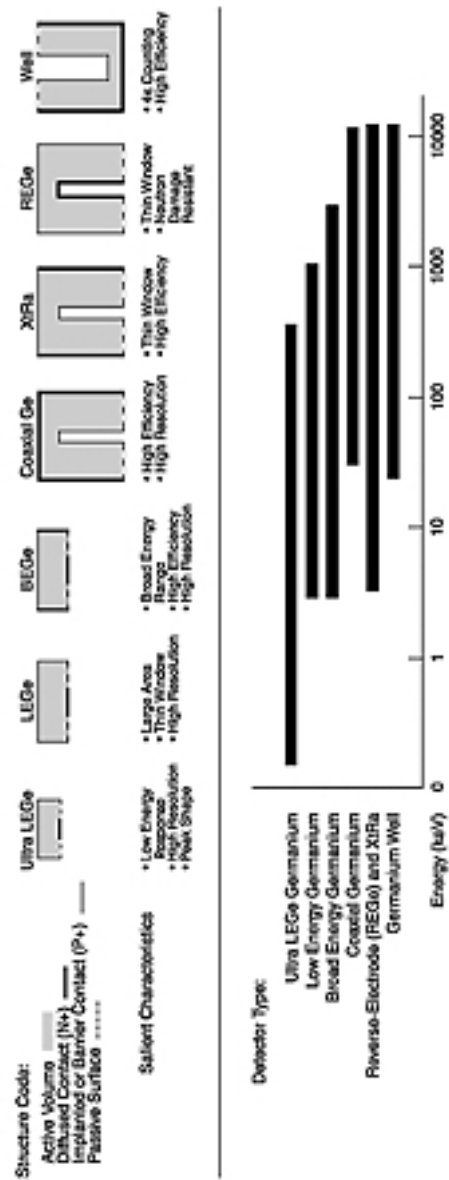


Figura 6.2: Diverse configurazioni geometriche di rivelatori al germanio. Intervalli di energia di impiego.

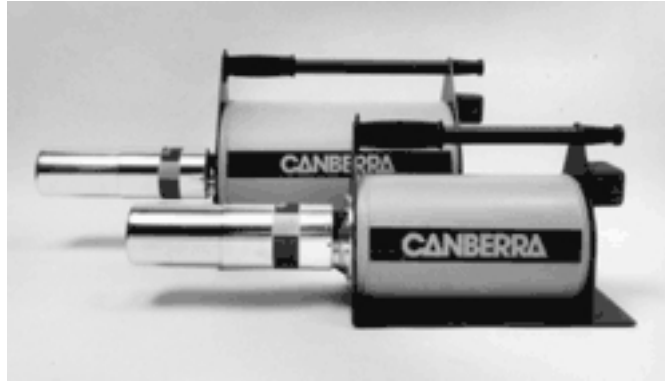


Figura 6.3: Vista del rivelatore al germanio e criostato.

6.4 Perché un rivelatore al Germanio Ultra LEGE?

La rivelazione di radiazioni elettromagnetiche richiede l'impiego di rivelatori opportuni alle varie energie [31].

Se ad esempio si è interessati alla rivelazione delle radiazioni gamma con energie di centinaia di keV o superiori è necessario utilizzare il germanio, il cui numero atomico Z superiore ($Z=32$ Ge, $Z=14$ Si) assicura un netto aumento della probabilità di interazione per una fissata geometria.

Qualora le radiazioni da rivelare siano di energia molto bassa, dell'ordine delle decine di keV, il materiale più idoneo è il silicio, che assicura anche in piccoli spessori un'efficienza intrinseca prossima al 100%.

Il valore elevato del coefficiente di interazione del germanio nella zona da 11 a 20 keV fa sì che pressoché tutte le interazioni avvengano nel primo strato del rivelatore e quindi la radiazione X di riassetamento dell'atomo di germanio che ha subito un effetto fotoelettrico ha una probabilità non trascurabile di fuoriuscire dalla zona sensibile. In questo caso l'impulso contribuisce al picco di fuga (*escape peak*) che ha una energia pari a 9,9 keV. L'efficienza di rivelazione nel picco principale ha pertanto un brusco calo a partire da 11,1 keV che è l'energia E_K di legame dell'elettrone K nel germanio. Nel caso di un rivelatore al silicio l'energia E_K è di 1,84 keV, quindi in un intervallo energetico di minore interesse. Inoltre le interazioni nel silicio sono distribuite maggiormente in profondità e quindi il fenomeno della fuga del quanto di riassetamento è poco importante.

E' evidente che un rivelatore per energie molto basse deve possedere una finestra di ingresso estremamente sottile e quindi molto delicata per non causare una forte attenuazione del fascio prima del suo ingresso nel rivelatore. La figura 6.4 mostra l'efficienza intrinseca di un rivelatore al germanio e di un rivelatore al silicio al variare dell'energia, in cui l'effetto della finestra è importante per energie inferiori a 10 keV.

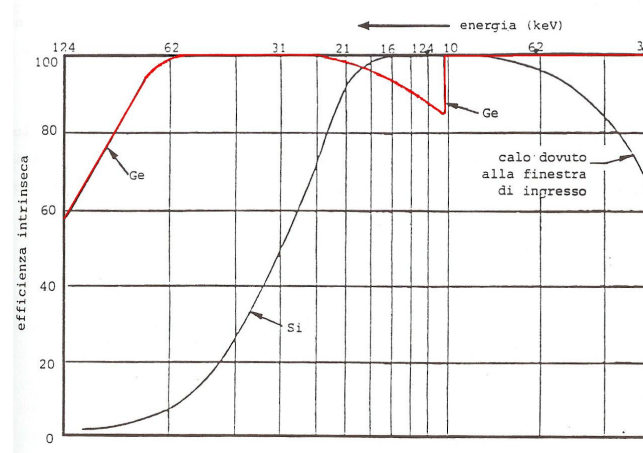


Figura 6.4: Andamento dell'efficienza intrinseca di rivelazione per rivelatori di silicio e di germanio con la stessa geometria (piana, con spessore $d=5$ mm).

A partire da 11,1 keV si ha una depressione nell'efficienza del germanio dovuto al fenomeno dell'escape ma ad energie superiori l'efficienza del germanio si mantiene nettamente più elevata di quella del silicio. Per diversi motivi, tra cui la disponibilità di germanio di purezza elevata e la possibilità di conservare i rivelatori a temperatura ambiente, si è sempre più diffuso l'impiego di rivelatori di germanio, cosiddetti Ultra LEGE, in grado di rivelare con efficienze ragionate radiazioni da pochi keV a centinaia di keV. Unico problema del loro impiego è tenere conto sempre del fenomeno dell'escape, come si vedrà nella procedura di ricostruzione degli spettri. [25]

6.5 Calibrazione del sistema di acquisizione

Prima di iniziare le misure sui fasci X di bassa energia, già caratterizzati con il metodo dosimetrico, sono stati acquisiti spettri di sorgenti radioattive per la calibrazione in energia ed efficienza ed, in seguito, per eseguire controlli periodici nelle varie giornate di misura onde evitare di acquisire spettri che presentassero parametri non uniformi. In Tabella 6.2 sono riportate le sorgenti di riferimento usate nella calibrazione con le relative caratteristiche spettrometriche.

Le sorgenti sono del tipo Amersham X.245¹ montate su di un supporto in plastica di spessore pari a 0,5 mm (Figura 6.5).

6.5.1 Calibrazione in energia

Sfruttando le sorgenti Amersham, le cui caratteristiche sono riassunte in Tabella 6.2, si è proceduto alla taratura in energia del sistema. Le sorgenti sono state posizionate su di un supporto autocentrante a due diverse distanze dal rivelatore (6 cm e 12 cm in modo da assicurare la riproducibilità del sistema) [45]. Si è poi proceduto ad acquisire gli spettri e all'analisi dei relativi picchi. Il software GENIE2000 di "emulazione multicanale" consente l'acquisizione degli spettri e

¹Sorgenti puntiformi elettrodeposte della dimensione di 1 mm sigillate.

Tabella 6.2: Principali caratteristiche delle sorgenti di raggi gamma impiegate nella calibrazione del sistema di rivelazione.

| Sorgenti | Attività*, kBq | Emissione gamma, keV | Probabilità di emissione, % |
|-------------------|---------------------|---------------------------|-----------------------------|
| ²⁴¹ Am | 441 ± 5% | 13.93 | 13.2 |
| | | 17.74 | 18.61 |
| | | 20.80 | 4.82 |
| | | 26.35 | 2.4 |
| ¹³³ Ba | 60.6 ± 5% | 59.54 | 35.9 |
| | | 30.625 (k _{a2}) | 35.1 |
| | | 30.973 (k _{a1}) | 64.3 |
| | | 34.92 (k _{β3}) | 6.09 |
| | | 34.987 (k _{β1}) | 11.8 |
| ¹³⁷ Cs | 194 ± 5% | 35.818 (k _{β2}) | 3.64 |
| | | 53.1625 | 2.199 |
| | | 31.817 (k _{a2}) | 1.96 |
| | | 32.194 (k _{a1}) | 3.58 |
| | | 36.304 (k _{β3}) | 0.342 |
| ⁵⁵ Fe | 64.6 ± (-5% ÷ +30%) | 36.378 (k _{β1}) | 0.66 |
| | | 37.255 (k _{β2}) | 0.209 |
| | | 5.888 (k _{a2}) | 8.2 |
| | | 5.898 (k _{a1}) | 16.2 |
| | | 6.49 (k _{β3}) | 0.96 |
| | | 6.49 (k _{β1}) | 1.89 |

* Le attività si riferiscono ad un certificato del 1-2-1976 (Am, Ba, Cs) e del 1-12-1992 (Fe).

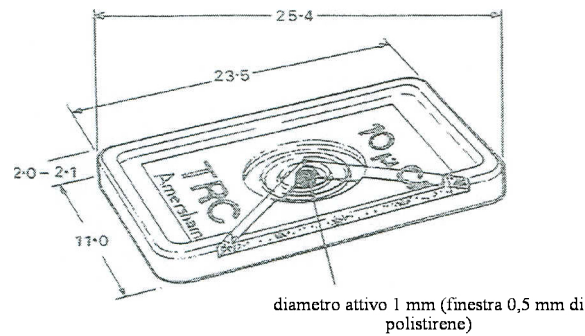


Figura 6.5: *Sorgente tipo X.245 (dimensioni in mm).*

la loro manipolazione. Il programma localizza il centroide dei picchi e stabilisce una corrispondenza canale-energia per ognuno di questi. Le relazioni canale-energia del centroide analizzate sono riportate nel report di calibrazione (Figura 6.6).

Da una analisi dei dati si è ottenuta una relazione sia lineare sia quadratica (Fig. 6.7). E' possibile osservare che è sufficiente una interpolazione lineare essendo nella regressione polinomiale il contributo di secondo grado dell'ordine di 10^{-8} circa [22].

```

*****
*****      E N E R G Y   C A L I B R A T I O N   R E P O R T      *****
*****

Detector Name:  LEGE1
Sample Title:   5 d= 50 cm

*****      ENERGY CALIBRATION COEFFICIENTS      *****

Energy Calibrate Performed on:  23/12/2005 15.56.22
by:
Energy Calibrate Type:           POLY

Energy(keV) =   -0.035 +      0.031*ch + -2.27E-008*ch^2 +   0.00E+000*ch^3

*****      SHAPE CALIBRATION COEFFICIENTS      *****

Shape Calibrate Performed on:  23/12/2005 15.56.22
by:

FWHM      =      0.029  +   0.042*E^1/2

LOW TAIL =   8.3E-002 +   3.7E-003*E

*****      ENERGY CALIBRATION RESULTS TABLE      *****

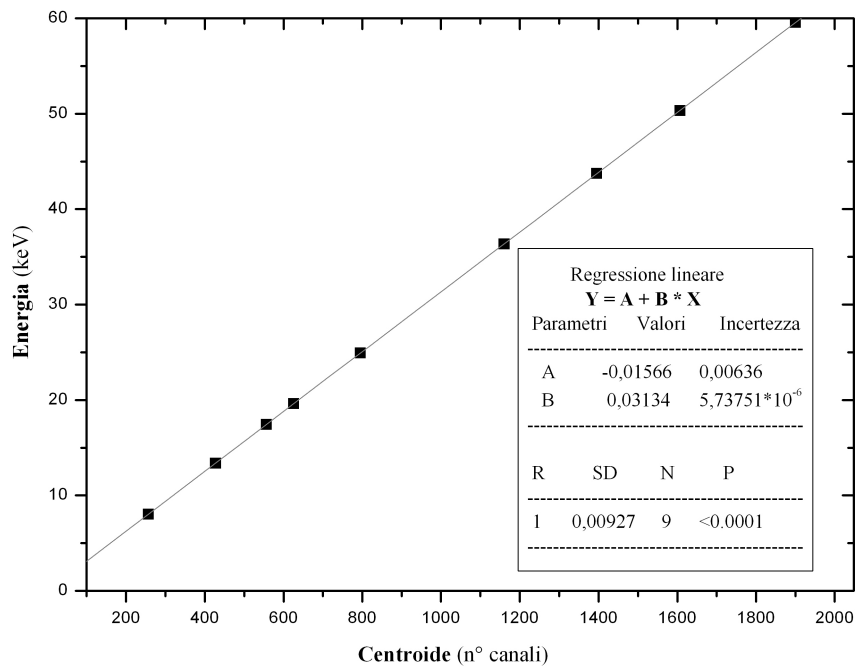
Centroid      Centroid      Energy
Channel      error      (keV )
257.28      0.05      8.04
427.29      0.00      13.38
557.01      0.00      17.44
626.05      0.00      19.60
795.51      0.00      24.93
1160.25     0.00      36.35
1395.59     0.00      43.74
1606.58     0.00      50.33
1900.37     0.00      59.54

*****      SHAPE CALIBRATION RESULTS TABLE      *****

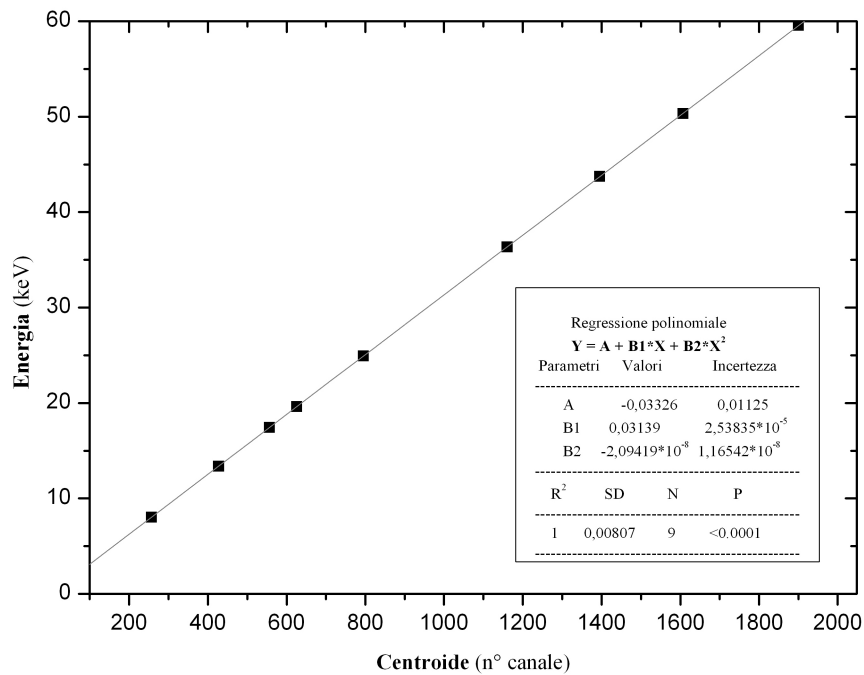
Energy      FWHM      FWHM      TAIL      TAIL
(keV )      channels  error      channels  error
8.04        4.74      0.11      3.59      0.50
13.38       6.15      0.00      4.17      0.00
17.44       7.45      0.00      5.97      0.00
19.60       7.17      0.00      7.89      0.00
24.93       6.85      0.00      4.59      0.00
36.35       9.27      0.00      6.73      0.00
43.74       8.60      0.00      5.56      0.00
50.33      12.03      0.00     10.76      0.00
59.54      10.64      0.00      9.08      0.00

```

Figura 6.6: Report della calibrazione in energia del sistema di acquisizione.



(a)



(b)

Figura 6.7: a) Calibrazione in energia - regressione lineare.
 b) Calibrazione in energia - regressione polinomiale.

6.5.2 La risoluzione in energia

La risoluzione energetica, ossia la capacità di distinguere nel modo migliore tra due valori di energia diversi ma molto prossimi, è un parametro molto importante in spettrometria. Se il rivelatore avesse una risposta alla radiazione incidente simile ad una delta di Dirac, fosse cioè un picco di larghezza nulla, qualsiasi differenza di energia sarebbe rivelabile. Purtroppo non è questo il caso reale. Infatti a causa delle fluttuazioni sul numero medio di eventi di ionizzazione ed eccitazione prodotti per una data energia incidente, la risposta avrà una larghezza finita. Possiamo allora definire la risoluzione R come $\Delta E/E$. Essa viene generalmente data in termini di larghezza totale ΔE misurata a metà altezza in corrispondenza del massimo, E (FWHM, *Full Width Half Maximum*).

L'ampiezza a mezza altezza può essere generalizzata mediante la seguente formula:

$$FWHM = a + b\sqrt{E + cE^2} \quad (6.1)$$

Nel caso in esame, i valori di questi parametri (calcolati mediante il software GENIE2000) sono i seguenti:

$$FWHM = 0,029 + 0,042 \cdot \sqrt{E}$$

con $a = 0,029$, $b = 0,042$ e $c = 0$.

6.5.3 Calibrazione in efficienza

In letteratura [18] sono riportate quattro tipi diverse di efficienza:

1. Efficienza totale del rivelatore
2. Efficienza del picco di assorbimento totale (*full-peak*)
3. Efficienza del picco di doppia fuga (*double escape-peak*)
4. Efficienza del picco di singola fuga (*single escape-peak*)

Tutte e quattro le efficienze sopra elencate possono essere intrinseche, assolute o relative.

L'efficienza totale intrinseca di un rivelatore è definita come la probabilità che un gamma di energia, E , incidente sul rivelatore contribuisca alla risposta. La geometria assunta per il calcolo o la misura di questa efficienza è riportata in Figura 6.8(a).

L'efficienza totale assoluta è definita come la probabilità che un gamma emesso da una sorgente, S , sia contata nel rivelatore (Fig. 6.8(b)). L'efficienza intrinseca dipende dall'energia della radiazione gamma e dalle dimensioni del rivelatore mentre l'efficienza totale dipende oltre che dall'energia e dalla dimensione del rivelatore, dal raggio dello stesso e dalla distanza sorgente-rivelatore. Di conseguenza l'efficienza totale è definita come il prodotto tra la percentuale dei fotoni che raggiungono il rivelatore rispetto al totale dei fotoni emessi dalla

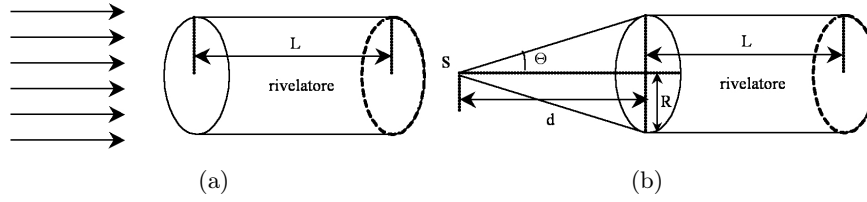


Figura 6.8: a) Geometria assunta nella definizione dell'efficienza intrinseca.
b) Geometria assunta nella definizione dell'efficienza assoluta.

sorgente (efficienza geometrica) e la geometria di raccolta (ovvero l'angolo solido sotto cui il rivelatore vede la sorgente).

L'efficienza del picco di assorbimento totale è definita come:

$$efficienza\ full\ peak = \frac{conteggi\ full\ peak}{conteggi\ totali} \quad (6.2)$$

Al punto 3 e 4 si fa riferimento ad efficienze significative per $E > 1,5$ MeV non contemplate in questo studio. L'efficienza relativa è definita come rapporto tra efficienza totale e efficienza standard di riferimento.

Poichè l'efficienza di raccolta di un rivelatore non è né costante su tutto l'intervallo energetico considerato né del 100%, ovvero non tutti i fotoni emessi da una sorgente risultano contribuire alla risposta, è necessario determinare una curva che evidenzi l'andamento del parametro efficienza, ε , in funzione dell'energia, dove:

$$\varepsilon = \frac{\gamma_{raccolti}}{\gamma_{emessi}}$$

La funzione di efficienza di full peak [33] è stata determinata sperimentalmente mediante l'uso di sorgenti sigillate Amersham ^{55}Fe , ^{241}Am e ^{133}Ba e applicando la seguente equazione.

$$\varepsilon = \frac{n}{t \cdot P_{\gamma}(E) \cdot N_0 \cdot \exp^{-\lambda t_d}} \quad (6.3)$$

dove

n è l'area netta sotto il full peak di energia E ;

t è il tempo di conteggio;

$P_{\gamma}(E)$ probabilità di emissione di radiazione γ di energia E ;

N_0 è l'attività della sorgente (Bequerel);

λ è la costante di decadimento $= \ln 2 / T_{1/2}$;

$T_{1/2}$ è la vita media del radionuclide;

t_d è il tempo di decadimento.

I risultati ottenuti sperimentalmente sono riportati in Tabella 6.3.

Tabella 6.3: Verifica sperimentale dell'efficienza del rivelatore per diverse energie.

| Radionuclide | E (keV) | Probabilità Emissione (%) | γ emessi (gamma/s) | γ raccolti (gamma/s) | Efficienza full peak ($\gamma_{\text{raccolti}}/\gamma_{\text{emessi}}$) |
|-------------------|------------|---------------------------------|------------------------------|--------------------------------|--|
| ⁵⁵ Fe | 5,89 | 24,4 | 15763 (-5%+30%) | 0,472 \pm 0,7% | 2,9 \cdot 10 ⁻⁵ (-5%+30%) |
| | 6,49 | 2,85 | 1841 (-5%+30%) | 0,1068 \pm 1,4% | 5,8 \cdot 10 ⁻⁵ (-5%+30%) |
| ²⁴¹ Am | 13,9 | 13,2 | 58174 \pm 2909 | 21,7 \pm 0,3% | 3,7 \cdot 10 ⁻⁴ \pm 5% |
| | 26,34 | 2,4 | 10577 \pm 529 | 7,5 \pm 0,6% | 7,1 \cdot 10 ⁻⁴ \pm 5% |
| | 33,196 | 0,119 | 524 \pm 26 | 0,395 \pm 2,5% | 7,5 \cdot 10 ⁻⁴ \pm 5,6% |
| ¹³³ Ba | 59,54 | 35,7 | 157335 \pm 7867 | 138,5 \pm 0,1% | 8,8 \cdot 10 ⁻⁴ \pm 5% |
| | 53,1625 | 2,199 | 1333 \pm 67 | 1,32 \pm 1,4% | 9,9 \cdot 10 ⁻⁴ \pm 5,2% |

6.6 Funzione della modellazione Monte Carlo nello studio dei campi di radiazione fotonica

E' necessario premettere che gli studi condotti nella presente tesi sono stati in gran parte centrati su misure sperimentali allo scopo di acquisire secondo standard metrologici gli spettri X di bassa energia in esame e di definirne le quantità dosimetriche associate allo scopo di utilizzarle per la calibrazione di strumentazione di radioprotezione.

A supporto di queste analisi sperimentali è però di grande importanza potere disporre di un adeguato strumento di simulazione numerica, tipicamente basato sul metodo Monte Carlo, che consenta di valutare parametri essenziali allo studio e comunque non determinabili sperimentalmente.

A tale scopo si è optato per l'uso del codice Monte Carlo MCNP (versione 4-C) [58], sviluppato presso i laboratori di Los Alamos, che da diversi anni viene impiegato presso l'Istituto di radioprotezione dell'ENEA nei diversi campi della dosimetria.

Il codice, che si basa su operatori di algebra booleana per la descrizione di geometrie di notevole complessità (dispone di funzioni spaziali fino al quarto ordine, torii) è provvisto di librerie di sezioni d'urto per fotoni, neutroni ed elettroni e dispone di un significativo supporto grafico che permette di analizzare le geometrie descritte. Il codice, provvisto di una efficace interfaccia-utente, è in grado di simulare il trasporto della radiazione fotonica da sorgenti di diversa complessità attraverso regioni dello spazio nelle quali è possibile individuare punti, porzioni di superficie o volumi entro cui ricavare risposte di interesse per lo studio condotto.

Nello specifico, per citare gli estimatori utilizzati nel presente studio (il codice dispone di una vasta serie di risposte che possono essere calcolate oltre a quelle usate nel presente lavoro), elenchiamo:

1. fluenza di fotoni, $\Phi(E)$, che si ottiene attraverso un estimatore di conteggi di attraversamenti di una data superficie ("boundary crossing tally", F2) o attraverso la valutazione delle lunghezze di traccia in un dato volume ("track-length tally", F4). E' possibile calcolare la dipendenza energetica della fluenza, cioè il suo spettro. Tale estimatore è stato fondamentale nella valutazione degli spettri di bassa energia alle diverse distanze dalla sorgente radiogena.
2. estimatore dello spettro dei conteggi in un rivelatore ("pulse height estimator", F8). Tale estimatore permette di riprodurre, date le caratteristiche fisiche di un rivelatore (ad esempio NaI o HPGe) la distribuzione degli impulsi in una predefinita scansione energetica che simula quella di un analizzatore multicanale. Tale estimatore è stato largamente impiegato per valutare l'efficienza del rivelatore al germanio impiegato e per calcolarne la matrice risposta in una scansione energetica molto fine (250 eV/canale). I parametri fisici necessari per completare l'operazione di ricostruzione degli spettri degli impulsi acquisiti sperimentalmente tramite una tecnica

di stripping sono stati in parte determinati attraverso simulazioni Monte Carlo.

In generale lo strumento modellistico si è rivelato di particolare utilità per l'accuratezza dello studio condotto.

6.6.1 Studio della geometria del rivelatore

Nel campo della metrologia di bassa energia risulta essere molto difficile ottenere buoni risultati nella determinazione sperimentale della curva di efficienza di rivelazione, in quanto la variazione della stessa nell'intervallo energetico considerato è molto elevata, in modo particolare sotto i 10 keV.

Per caratterizzare il rivelatore in termini di efficienza ed anche a validazione di quanto ottenuto mediante sorgenti elettro-depositate è stato necessario sviluppare un modello Monte Carlo dello stesso.

Grazie alle informazioni reperite sui certificati forniti dalla casa costruttrice si è definita una regione spaziale per simulare la capsula esterna di alluminio contenente il cristallo, una per il germanio e non ultima una per la finestra di berillio. Non avendo a disposizione informazioni dettagliate riguardo lo spessore dello strato morto del rivelatore, all'interno del germanio si sono inoltre simulati un certo numero di spessori; quindi si è fatta l'assunzione che lo spessore corrispondente ad una curva di efficienza calcolata che meglio si adatta ai valori ottenuti sperimentalmente corrisponda allo spessore dello strato morto del rivelatore. In figura 6.9 è riportata la geometria MCNP 4C impiegata per i calcoli dell'efficienza del rivelatore in funzione della variazione dello spessore dello strato morto: 0,1 μm , 0,3 μm , 1 μm , 2 μm , 3 μm , 4 μm , 5 μm , 7 μm , 10 μm , 13 μm e 15 μm .

Una particella emessa dalla sorgente di radiazione ha una certa probabilità di depositare nel cristallo tutta la sua energia. Ciò dipenderà dall'energia stessa nonché dalle dimensioni e dal tipo di rivelatore. Nel caso in cui l'impulso registrato dal sistema rivelatore-analizzatore multicanale non corrispondesse all'energia del fotone incidente, per ottenere la reale distribuzione è necessario effettuare correzioni che dipendono dallo spessore dello strato morto, dalla finestra di berillio e dallo spessore d'aria tra fuoco e punto di misura.

Il primo passo per ottenere lo spettro reale, prodotto dalla sorgente di raggi X, consiste nell'ottenere la distribuzione degli impulsi (PHD) registrata dal rivelatore. Il programma MCNP 4C dispone di un estimatore F8 che permette di ottenere tale distribuzione.

In figura 6.10 è riportata la geometria del rivelatore e della sorgente radioattiva impiegata per ottenere la curva di efficienza e la funzione risposta del rivelatore, ottenuta con il programma SABRINA, che permette una visualizzazione 3D del sistema utilizzato.

In figura 6.11 sono mostrati due spaccati con il particolare della finestra di berillio (giallo) il cui spessore è tale da rendere minimi gli assorbimenti delle famiglie di radiazioni considerate.

Infine, in figura 6.12 è riportato un esempio delle traiettorie delle particelle simulate con questo modello.

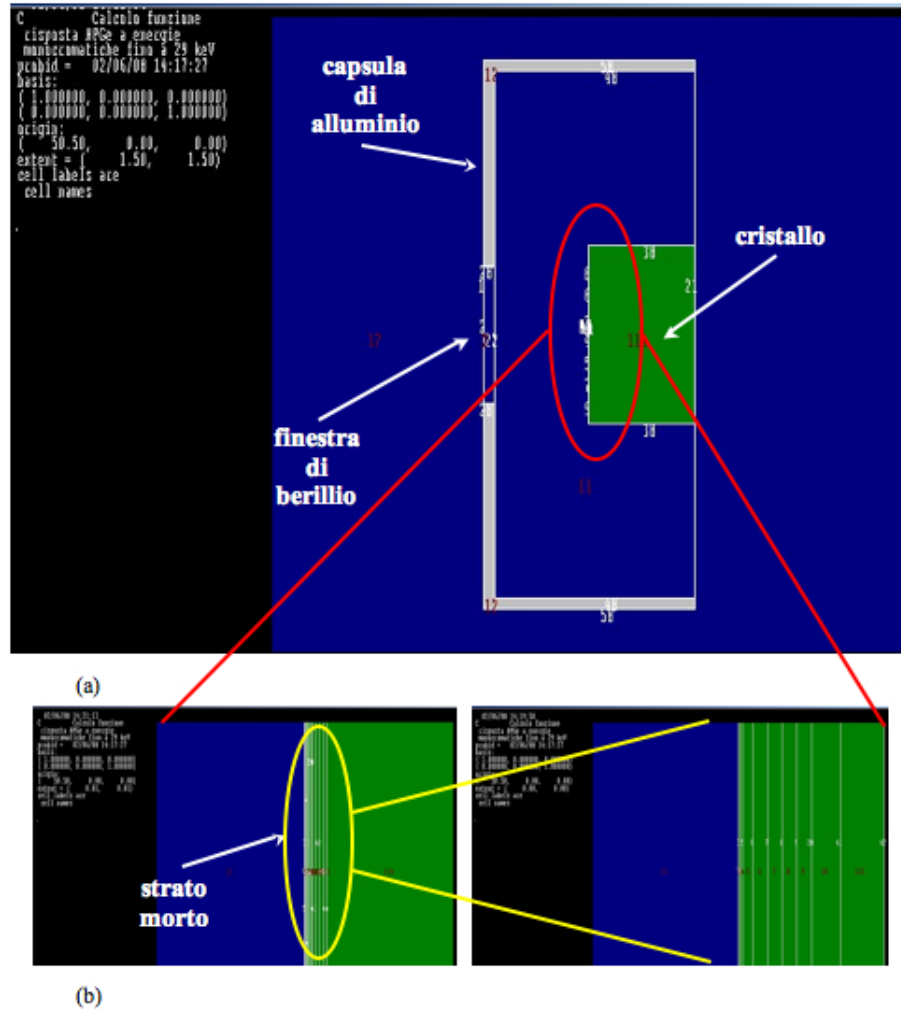


Figura 6.9: a) Sezione del rivelatore ottenuta con MCNP 4C.
b) Particolari degli strati morti considerati per i calcoli dell'efficienza di rivelazione.

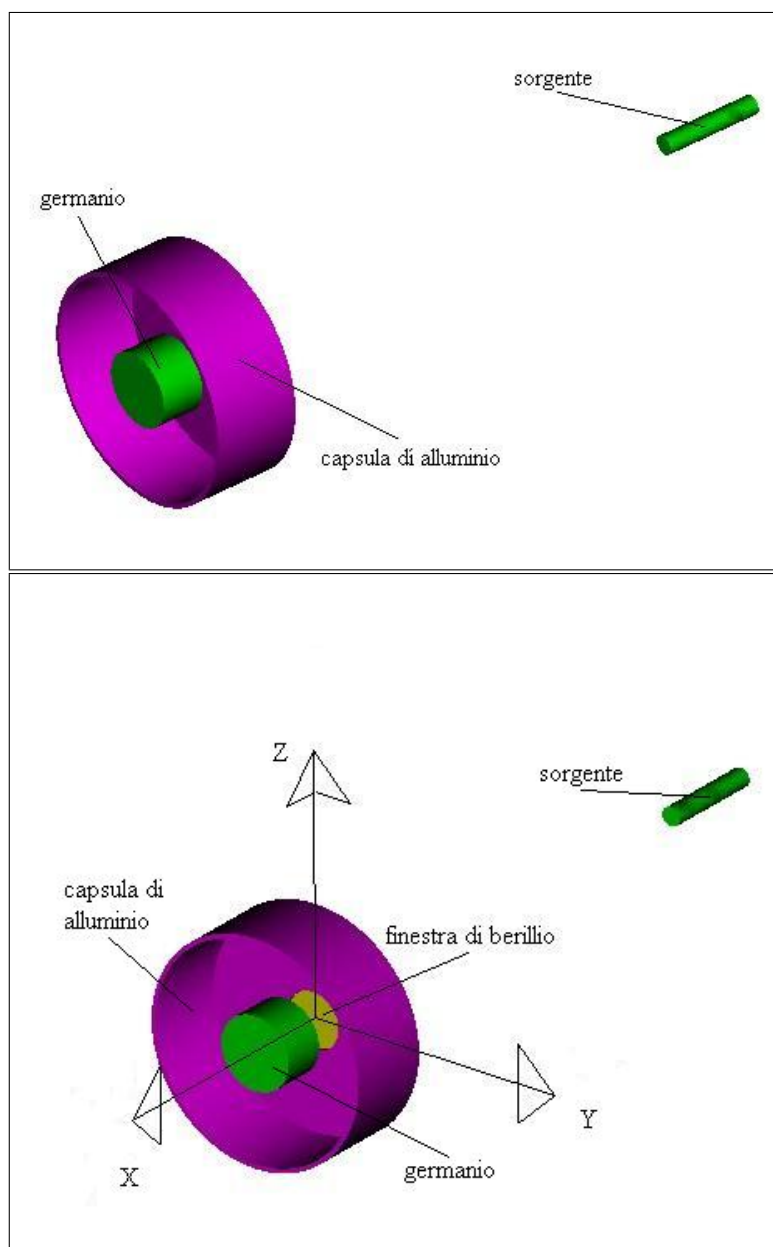


Figura 6.10: Particolari della geometria del rivelatore e della sorgente impiegata per il calcolo della funzione risposta del sistema di rivelazione utilizzato.

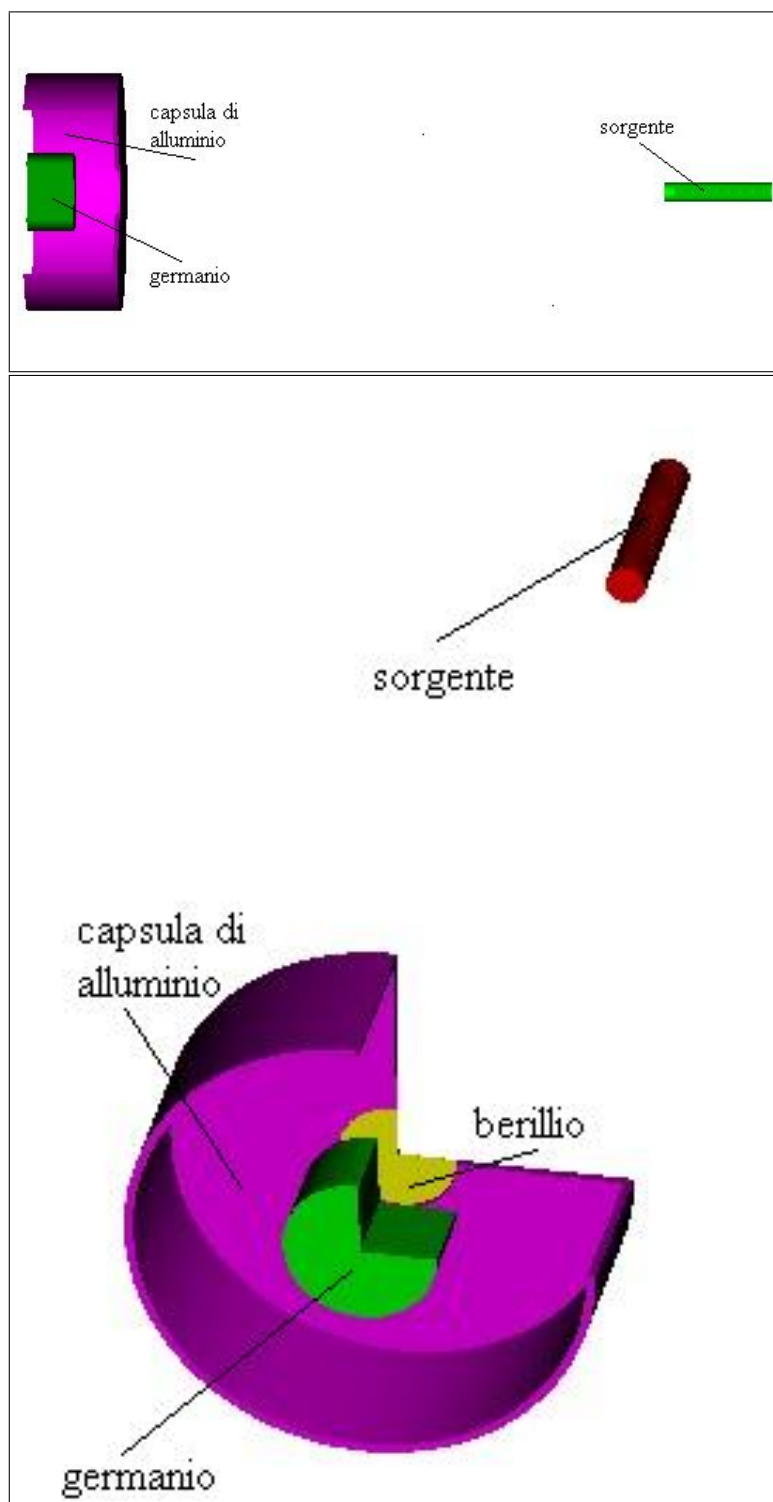


Figura 6.11: *Spaccati della geometria con particolare della finestra di berillio e della posizione del cristallo rispetto alla stessa.*

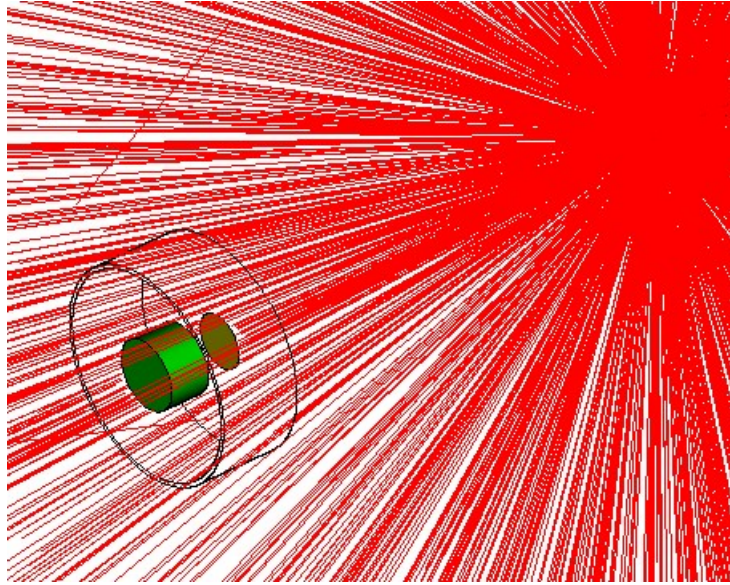


Figura 6.12: *Esempio delle traiettorie delle particelle all'ingresso del rivelatore.*

Non avendo a disposizione informazioni dettagliate dalla casa costruttrice sullo spessore dello strato morto si è effettuato uno studio parametrico, andando ad esaminare la risposta in efficienza del rivelatore in funzione dell'energia della radiazione incidente.

6.6.2 Determinazione Monte Carlo della curva di efficienza e dello spessore dello strato morto (dead layer) del rivelatore

Numerosi sono i laboratori che hanno impiegato ed impiegano tutt'ora simulazioni numeriche per ottenere la funzione risposta ad un flusso di fotoni di un rivelatore irraggiato con fotoni.

Storicamente, i primi furono ricercatori come Wainio e Knoll (1966) che usarono il codice Monte Carlo per la determinazione della curva di efficienza di full-peak (FEPE), mentre altri ottennero buoni risultati confrontando i dati sperimentali ottenuti con interpolazioni semi-empiriche (Owens, 1989; Kamboj e Kahn, 1994). Bronson e Wang (1996) riportarono un'esaustiva descrizione sull'uso del codice Monte Carlo N-Particle (MCNP) nella determinazione dell'efficienza calcolata a diverse geometrie e distanze sorgente-rivelatore [21].

L'importanza di utilizzare il codice Monte Carlo nasce dal fatto che è fondamentale, nella ricostruzione degli spettri X, la conoscenza di una curva di efficienza ottenuta in funzione di punti energetici monocromatici, altrimenti non ottenibili sperimentalmente, se non introducendo forti semplificazioni. I problemi incontrati sono dovuti alle informazioni insufficienti fornite dalla casa costruttrice in relazione alle caratteristiche del rivelatore fornito.

Sono state calcolate diverse curve di efficienza al variare dello spessore dello strato morto (Figura 6.13). I risultati ottenuti dalle simulazioni sono stati

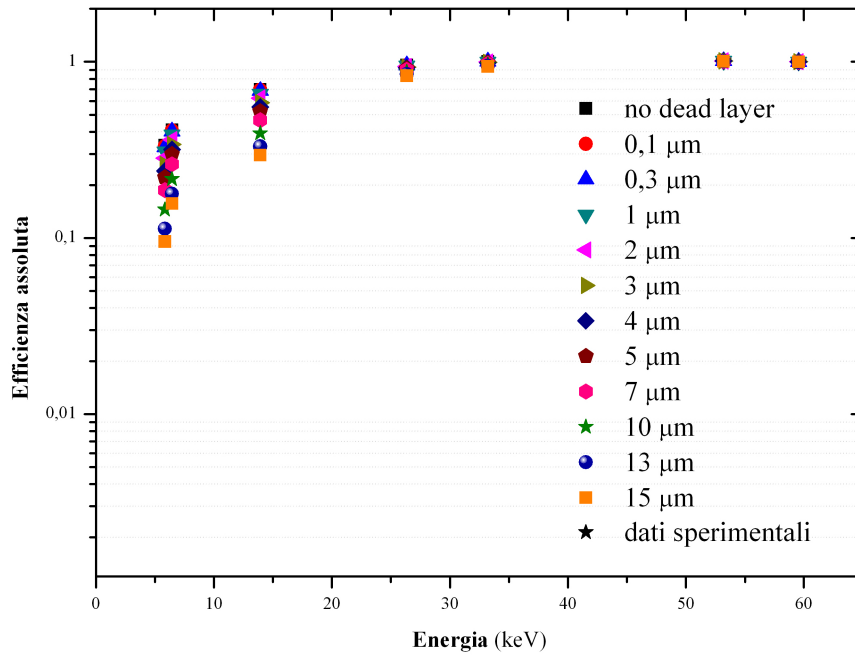


Figura 6.13: Curve di efficienza simulate e sperimentali al variare dello spessore dello strato morto del rivelatore HPGe.

confrontati con i dati sperimentali ottenuti con le sorgenti di ^{241}Am , ^{133}Ba e ^{55}Fe . Il migliore accordo tra i dati sperimentali e quelli ottenuti dalla simulazione è stato ottenuto per uno spessore dello strato morto compreso tra 7 e 10 μm . Il risultato si discosta in modo significativo da quanto indicato dalla casa costruttrice.

In Figura 6.14 è riportato il rapporto tra il valore di efficienza simulato e misurato sperimentalmente al variare dello spessore dello strato morto. È evidente come tale rapporto si avvicini ad uno all'interno delle incertezze per spessori compresi fra 7 e 10 μm .

I dati ottenuti sperimentalmente sono affetti da incertezze dell'ordine di $\pm 5\%$. In Figura 6.15 si riportano i valori dei dati sperimentali e la curva di efficienza ottenuta dalla simulazione numerica. L'intervallo di energia della simulazione è compreso fra 1 keV (energia di cut-off del Monte Carlo) e 60 keV. È possibile osservare il buon accordo tra i valori sperimentali e quelli ottenuti dal calcolo.

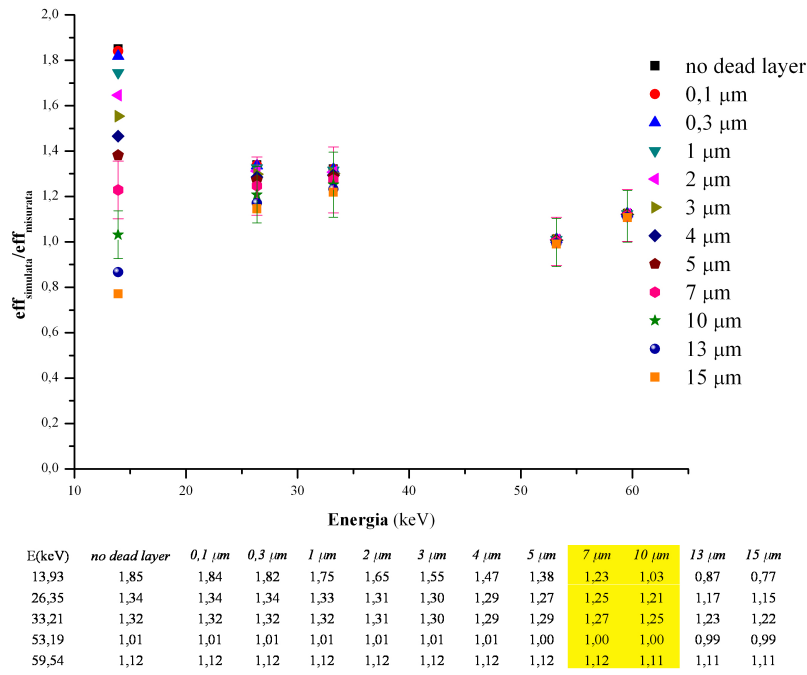


Figura 6.14: Rapporto tra l'efficienza di rivelazione simulata e misurata sperimentalmente per diversi spessori di dead layer.

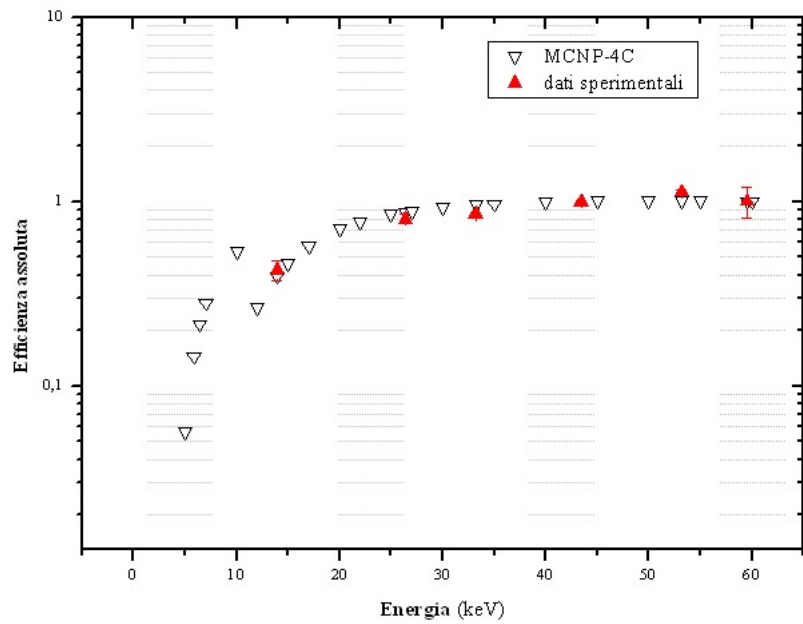


Figura 6.15: Confronto tra i dati sperimentali e la curva ottenuta dalla simulazione per lo strato morto scelto.

6.7 Acquisizione degli spettri RX sperimentali

Una volta effettuata la calibrazione in energia ed efficienza del sistema di misura si è proceduto all'acquisizione degli spettri. Il fascio prodotto dal tubo a raggi X è collimato con una serie di diaframmi posizionati prima e dopo la camera monitor tali da produrre un fascio di 8 cm di diametro a 50 cm di distanza dal fuoco del tubo e di 32 cm di diametro a 200 cm di distanza. Davanti alla superficie del rivelatore sono stati posizionati due diaframmi disassati in piombo con diametro risultante di circa 0,1 mm. Tale collimatore ha il compito di ridurre il numero di fotoni entranti nel rivelatore e di eliminare effetti di *pile-up* e di radiazione diffusa. I fasci laser posti sul banco ottico sono stati utilizzati per allineare il diaframma e l'intero sistema spettrometrico sull'asse del fascio.

Le misure di spettro degli impulsi sono state effettuate a due diverse distanze già più volte menzionate. La corrente del tubo è stata posta a 0,1 mA al fine di rendere nulli i conteggi dovuti al *pile-up*. A monte di ogni acquisizione di spettro è stata effettuata una misura di fondo.

I dati spettrali sono stati pre-elaborati onde ridurre il rumore elettronico ed esaltare le differenze fra gli spettri. Il metodo che è stato applicato per ottenere un filtro di smoothing delle distribuzioni acquisite è quello di Savitzky-Golay [24] con 5 punti di smoothing. Questo metodo è il migliore per rimuovere dagli spettri il rumore presente mantenendo la forma del segnale.

Un tipico filtro digitale di una serie di dati

$$f_i \equiv f(t_i), t_i = t_0 + i\Delta, \Delta = \text{passo del campionamento} \quad (6.4)$$

sostituisce ogni f_i con un'opportuna combinazione lineare di elementi della serie

$$g_i = \sum_{n=-N_l}^{N_r} c_n \cdot f_{i+n} \quad (6.5)$$

dove N_l e N_r sono rispettivamente il numero di elementi della serie precedenti e successivi all' i -esimo, per una finestra di valori $[f_{i-N_l}, f_{i+N_r}]$. Viene così prodotta una nuova serie g_i che costituisce la serie filtrata.

La scelta più semplice dei coefficienti è prenderli uguali alla costante $c_n = (N_l + N_r + 1)^{-1}$, che significa porre g_i uguale alla media di f_i sulla finestra $[f_{i-N_l}, f_{i+N_r}]$. Il vantaggio di tale scelta, talvolta detta *Moving Window Averaging*, consiste nella proprietà di invarianza del momento zero (l'area sotto il grafico) e del momento primo (la media) se $N_r = N_l$, nella trasformazione $f \rightarrow g$. I limiti di questa scelta sono invece la modifica dei momenti di ordine superiore: ad esempio applicare un Moving Window Averaging nell'intorno di un massimo locale f_M comporta sicuramente la riduzione del massimo nella serie filtrata ovvero $g_M \leq f_M$, e intuitivamente l'appiattimento e l'allargamento della funzione g rispetto alla funzione f .

Una scelta diversa dei coefficienti c_n che preservi i momenti di ordine superiore è l'idea base dei *Savitzky-Golay smoothing filters* che è stato utilizzato per ogni spettro ed in modo particolare in quelli che presentavano picchi (picchi caratteristici).

I Savitzsky Golay smoothing filters invece di utilizzare in ogni finestra un polinomio di grado zero (la costante) utilizzano polinomi di grado M (in generale $M=2$ o $M=4$): per ogni punto f_i si determina il polinomio p_i^M per mezzo del fit dei minimi quadrati sui valori della nestra $[f_{i-N_l}, f_{i+N_r}]$, e si pone

$$g_i = p_i^M(i) \quad (6.6)$$

Il valore del polinomio viene calcolato solamente nel punto i -esimo; per il punto $(i+1)$ -esimo viene calcolato un nuovo polinomio p_{i+1}^M .

Anche se questo procedimento sembra molto dispendioso algebricamente, il fit dei minimi quadrati coinvolge solamente inversioni di matrici, e genera quindi i coefficienti polinomiali a_j come combinazione lineare delle f_k nella nestra $[f_{i-N_l}, f_{i+N_r}]$. Naturalmente questo assicura l'esistenza di un insieme c_n per il quale la serie filtrata

$$g_i = p_i^M(i) = \sum_{k=0}^M c_n \cdot f_{n+1} \quad (6.7)$$

viene formata mediante elementi adiacenti della serie originale e automaticamente genera i coefficienti del polinomio soddisfacente il fit.

Mediante il polinomio $a_0 + a_1 i + a_2 i^2 + \dots + a_M i^M$ otteniamo la seguente espressione per i coefficienti c_n e a_j :

$$c_n = \sum_{k=0}^M (\mathbf{A}^T \cdot \mathbf{A})_{0k}^{-1} \cdot n_k \quad (6.8)$$

$$\mathbf{a} = (\mathbf{A}^T \cdot \mathbf{A})^{-1} (\mathbf{A}^T \cdot \mathbf{f}) \quad (6.9)$$

dove $\mathbf{A}_{ji} = j^l$; $j = -N_l, \dots, N_r$; $l = 0, \dots, M$; $\mathbf{a}_l = a_l$; $\mathbf{f}_k = f_k$.

Quanto riportato sopra è molto evidente in Figura 6.16 e 6.17 dove è messo a confronto lo smoothing su di uno stesso spettro ottenuto con un filtro di media mobile pesato (Moving Window Averaging) ed un filtro di smoothing di Savitzky-Golay. E' evidente come applicando una semplice operazione di media mobile si perdano le informazioni reative ai picchi di fluorescenza pur eliminando il rumore.

Gli spettri degli impulsi acquisiti, con E_{\max} inferiore a 60 keV, e dopo l'applicazione del filtro di Savitzky-Golay (ottenuto con un software commerciale ORIGIN 8) sono riportati in Appendice A.

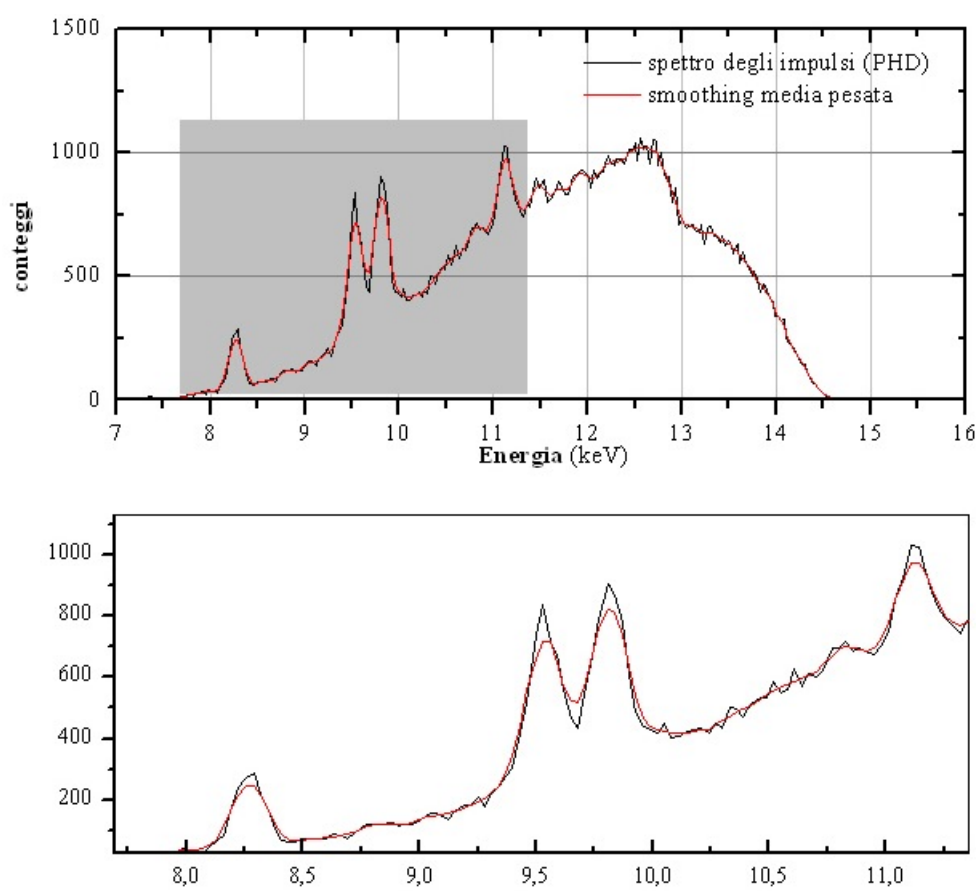


Figura 6.16: Fascio N15 ottenuto applicando uno smoothing di media pesata.

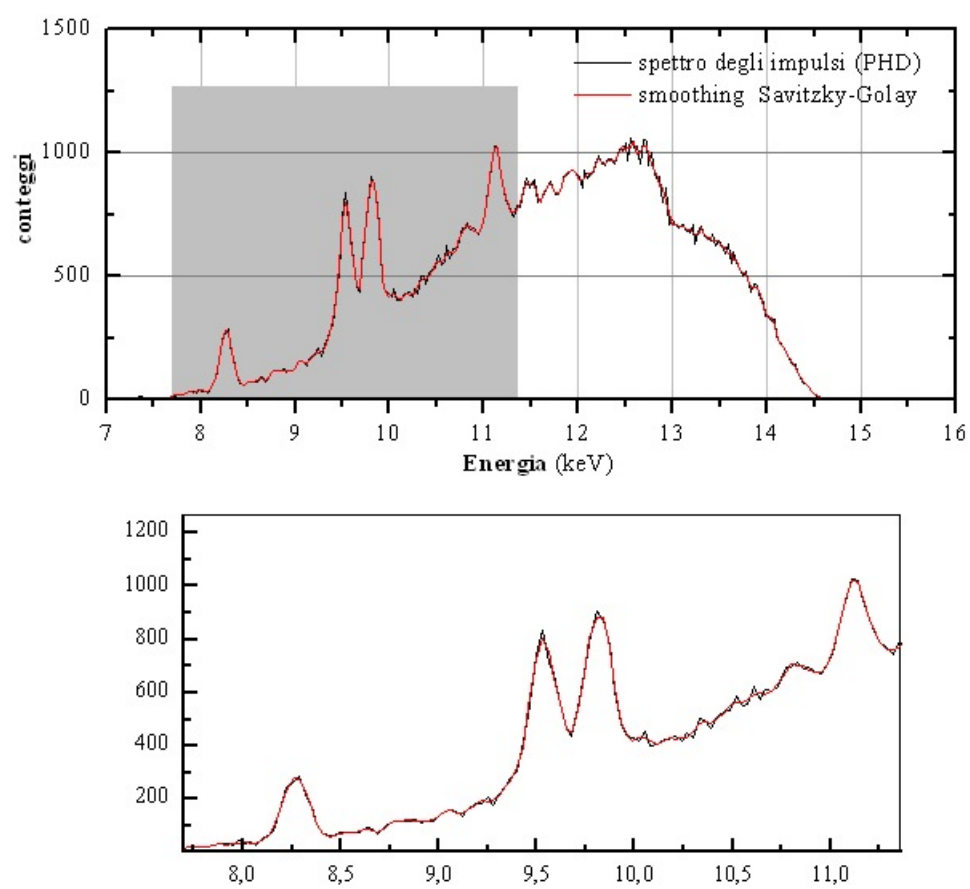


Figura 6.17: Fascio N15 ottenuto applicando un filtro *fi Savitzky-Golay*.

Capitolo 7

Ricostruzione dello spettro di raggi X primario

7.1 Introduzione

Il risultato di una misura spettrometrica è dato dalla distribuzione dello spettro degli impulsi. Come è noto i raggi gamma cedono la loro energia al rivelatore principalmente secondo i tre effetti: fotoelettrico, diffusione Compton e creazione di coppie. La prevalenza dell'uno e dell'altro dipende essenzialmente dall'energia dei quanti incidenti [18].

Per energie inferiori a 300 keV le correzioni da applicare al fine di ottenere lo spettro fotonico incidente sul rivelatore sono: le correzioni per il picco di fuga K del rivelatore al germanio e per la diffusione Compton.

In letteratura, numerosi sono i laboratori che hanno riportato misure di spettri a raggi X ottenuti con rivelatori del tipo NaI(Tl) o Ge (HPGe). Come riportato nei paragrafi precedenti, le caratteristiche dell'impianto radiologico come filtrazione, tensione applicata al tubo a raggi X, materiale componente l'anodo, spessore e materiale della finestra del tubo vanno ad influire sulla forma della distribuzione dello spettro. Per ricostruire il reale spettro incidente sul rivelatore è necessario applicare specifiche procedure di deconvoluzione dello spettro o *stripping* canale per canale [26, 29].

7.2 Interazione delle radiazioni elettromagnetiche

Le radiazioni elettromagnetiche di interesse in questo lavoro sono comprese da 1 keV a 60 keV

Il risultato diretto di una misura spettrometrica consiste di una distribuzione degli impulsi e non di uno spettro fotonico. Per capire la differenza di tale affermazione, è necessario considerare le possibili interazioni di un fotone incidente sul rivelatore [34, 38].

1. **Assorbimento fotoelettrico:** consiste nell'interazione di un fotone con un elettrone orbitale che ha come conseguenza il completo assorbimento del fotone e l'espulsione dell'elettrone con un'energia cinetica $T_{el} = h\nu -$

Tabella 7.1: Righe di fluorescenza caratteristiche del germanio.

| Energia (keV) | Elemento | Linee caratteristiche | Intensità Relativa (%) | Media pesata (keV) |
|------------------|------------------|--------------------------|------------------------------|-----------------------|
| 9,8553 | ³² Ge | K α_2 | 51 | 9,876 |
| 9,8864 | ³² Ge | K α_1 | 100 | |
| 10,978 | ³² Ge | K β_3 | 6 | 10,982 |
| 10,9821 | ³² Ge | K β_1 | 60 | |

E_{leg} . A seconda delle dimensioni e del tipo di rivelatore utilizzato ci possono essere diverse situazioni:

- Il fotone incidente deposita completamente la sua energia all'interno del rivelatore (non si produce un fotone di fluorescenza o non viene assorbito da successive interazioni fotoelettriche).
- Il fotone non è assorbito all'interno del volume del rivelatore al momento dell'interazione in quanto la sua energia è associata ad un fotone che si produce ed esce dal rivelatore. In questo caso il fotone incidente è contato con una energia inferiore pari a $E = E_0 - E_k$ dove E_0 e E_k sono rispettivamente le energie del fotone incidente e dei fotoni k che escono dal rivelatore. La probabilità che si formi un picco di fuga con un rivelatore al Ge è piuttosto alta (dal 20% al 3%) nell'intervallo energetico fra 11-35 keV a causa del piccolo spessore medio di penetrazione dei fotoni a queste energie. Questi spessori sono comparabili con i percorsi medi dei fotoni corrispondenti alle energie delle righe caratteristiche del Ge (circa 10 keV) (Tabella 7.1).

2. Diffusione incoerente (Compton) e coerente (Rayleigh): da un punto di vista sperimentale l'effetto Compton consiste nell'interazione di un fascio di radiazione elettromagnetica con un materiale dal quale la radiazione viene diffusa con energie inferiori e decrescenti al crescere dell'angolo di diffusione. Il fenomeno è immediatamente interpretabile come il risultato dell'interazione dei singoli fotoni con gli elettroni del mezzo, che possono essere considerati liberi e la loro energia di legame è molto inferiore all'energia dei fotoni. Se poi l'interazione avviene con elettroni molto legati, il fotone viene diffuso elasticamente con energia quasi inalterata. A questo fenomeno si dà il nome di **effetto Rayleigh**: è molto importante nella pratica solo a basse energie e in materiali con alto Z.

- Con l'aumentare delle dimensioni del rivelatore aumenta la probabilità che il fotone diffuso subisca una sequenza di interazioni che lo portano a una deposizione completa della sua energia all'interno del volume del rivelatore. In questo caso il fotone è contato nel canale corretto, corrispondente all'energia del fotone incidente.
- Il fotone diffuso potrebbe uscire dal rivelatore. In questo caso il fotone è contato con l'energia che è stata trasferita all'elettrone Compton.

Questa energia sarà più bassa dell'energia del Compton edge, E_e (keV):

$$E_e = \frac{2E_0^2}{(2E_0 + 511)} \quad (7.1)$$

Questo effetto porterà ad un continuo Compton inferiore a E_e che diventa considerevole nella distribuzione dello spettro degli impulsi per tensioni applicate al tubo superiroi a 100 kV.

Nei rivelatori al germanio il continuo Compton dovuto ai fotoni diffusi è l'effetto spurio più importante per energie oltre i 100 keV. L'unico modo per conoscere la frazione di continuo Compton prodotto dai diversi fotoni incidenti di energia E_0 è mediante simulazioni Monte Carlo.

3. Il fotone non interagisce affatto con il rivelatore.

Gli effetti sopra descritti portano ad applicare due tipi di correzioni:

1. I conteggi nei canali corrispondenti alle energie dei picchi formati a causa della presenza dei picchi di fuga del germanio ($E_{\text{picco totale di assorbimento}} - E_{\text{picchi di fluorescenza}}$) (1(b)) e al processo di diffusione Compton (2(b)) devono essere sottratti.
2. Solo una frazione I di un numero I_0 di fotoni incidenti di una data energia sono contati nel canale corretto. Il rapporto $\varepsilon = I/I_0$ è riferito all'efficienza del picco di assorbimento totale (full peak). Il numero di conteggi, ripuliti dei conteggi da attribuirsi alla presenza del picco di fuga K ed al fenomeno Compton, devono essere infine corretti per l'efficienza del rivelatore.

7.3 Funzione di stripping

Per potere ripulire lo spettro dei conteggi acquisito dai conteggi spuri dovuti ai fenomeni sopra illustrati è necessario mettere a punto una procedura iterativa denominata stripping.

Tale procedura per gradi, che inizia dal canale di energia più alto fino a quello di energia più bassa, è multifunzionale per spettri con un numero elevato di canali. Una volta ottenuta una dettagliata informazione della frazione di conteggi persi per diffusione Compton e per i picchi di fuga K, correggendo inoltre il numero dei conteggi per l'efficienza di full peak, si ottiene il vero numero di fotoni corrispondente a quel canale di energia E_0 . Questi step sono ripetuti per tutti i canali fino alle energie più basse (1 keV). L'equazione che è stata applicata ad ogni canale è la seguente:

$$N_t(E_0) = [N_m(E_0) - \eta_k(E_0 + 10)N_t(E_0 + 10) - \sum_{E=E^*}^{E_{max}} h(E)N_t(E)]/\varepsilon(E_0) \quad (7.2)$$

dove

N_t =numero di fotoni reali,

N_m =numero di fotoni misurati (distribuzione degli impulsi),
 $\eta_k(E)$ =frazione di conteggi da attribuirsi ai picchi di fuga K,
 $h(E)$ =fattore di correzione del continuo Compton,
 $\varepsilon(E)$ =efficienza di full peak,
 E^* =energia del Compton edge (MeV),
 E_{\max} =energia massima dello spettro.

Per un rivelatore di 5 mm di spessore e per energie tra l'energia del Compton edge del germanio (~ 10 keV) e 60 keV circa, si può assumere che la fuga K sia l'unica fonte significativa di perdita di conteggi. L'efficienza full peak potrebbe quindi essere calcolata una volta nota la frazione di fotoni K, η_k , come $\varepsilon = 1 - \eta_k$. I canali che vengono corretti per i picchi di fuga K sono quelli che vanno da 1 keV a 50 keV.

Il primo passo è consistito, mediante calcoli Monte Carlo, nella verifica dei conteggi dei fotoni persi per diffusione Compton, risultati pressochè trascurabili e successivamente nella valutazione, sia sperimentale sia Monte Carlo, della percentuale dei conteggi da attribuirsi ai picchi di fuga K [32, 42, 43].

7.4 Frazione dei conteggi persi per diffusione Compton

Per determinare i conteggi persi per diffusione Compton sono stati effettuati calcoli Monte Carlo per energie monocromatiche da 1 keV a 60 keV, con scansione di 1 keV. Da ogni calcolo si è ottenuto il numero di conteggi per canale e l'area totale del picco di assorbimento a seconda dell'energia monocromatica considerata.

Prima di tutto ogni spettro dei conteggi per fotoni incidenti monocromatici ottenuto dal calcolo Monte Carlo è stato ripulito dei picchi di fuga K. Successivamente, per stimare i fotoni persi per diffusione Compton, ad ogni canale, è stata applicata la seguente operazione matriciale:

$$h(E) = \frac{c_{i,i=1,\dots,2048}}{C_{FP,E_n,n=1,\dots,60}} \quad (7.3)$$

dove

c_i è il totale dei conteggi al canale i -esimo,

C_{FP,E_n} è il totale dei conteggi nel full-peak.

In sintesi $h(E)$ esprime la percentuale dei fotoni persi per diffusione Compton rispetto al totale dei conteggi nel picco di assorbimento totale (full peak).

Applicando tale operazione ad ogni canale e per ogni energia monocromatica si è ottenuto la percentuale dei fotoni persi per diffusione Compton. In Figura 7.1 è riportato uno schema dell'operazione eseguita.

7.5 Frazione di conteggi dovuti al picco di fuga K

Per determinare la frazione di conteggi persi a causa dei picchi di fuga K sono stati acquisiti spettri di sorgenti sigillate elettro-depositare Amersham (^{241}Am , ^{133}Ba , ^{137}Cs) poste su di un supporto autocentrante a 6 cm dalla superficie del

| | | Energia monocromatica (keV) | | | | |
|--|------------|-----------------------------|-------------------|-----|-------------------------|-------------------------|
| Totale conteggi per canale c_i^{**} <small>**ogni spettro monocromatico è ripulito dei picchi di fuga k</small> | | E_1 | E_2 | ... | E_{59} | E_{60} |
| | c_1 | $c_1 / C_{FP,E1}$ | $c_1 / C_{FP,E2}$ | ... | $c_1 / C_{FP,E59}$ | $c_1 / C_{FP,E60}$ |
| | c_2 | 0 | $c_2 / C_{FP,E2}$ | ... | $c_2 / C_{FP,E59}$ | $c_2 / C_{FP,E60}$ |
| | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| | c_{2047} | 0 | 0 | ... | $c_{2047} / C_{FP,E59}$ | $c_{2047} / C_{FP,E60}$ |
| | c_{2048} | 0 | 0 | ... | 0 | $c_{2048} / C_{FP,E60}$ |

| Per ogni calcolo: | area full peak, E_1 | area full peak, E_2 | ... | area full peak, E_{59} | area full peak, E_{60} |
|-------------------|-----------------------|-----------------------|-----|--------------------------|--------------------------|
| | $C_{FP,E1}$ | $C_{FP,E2}$ | | $C_{FP,E59}$ | $C_{FP,E60}$ |

Figura 7.1: Schema dell'operazione eseguita per determinare il contributo Compton. Il contributo da attribuirsi al fenomeno della diffusione Compton è stato valutato canale per canale come rapporto tra i conteggi nel canale i -esimo ed il totale dei conteggi del picco di assorbimento totale (full-peak).

Tabella 7.2: ROI delle sorgenti impiegate per la valutazione dei conteggi persi per i picchi K del germanio.

| Sorgente | Energy (keV) | Region Of interest inizio | Region of interest fine | Centroide picco |
|-------------------|-----------------|------------------------------|----------------------------|--------------------|
| ²⁴¹ Am | 59.54 | 1877 | 1930 | 1900 |
| | 49.66 | 1501 | 1599 | 1584 |
| | 48.56 | 1501 | 1599 | 1551 |
| | | | | |
| | 13.93 | 417 | 550 | 442 |
| | 4.05 | 98 | 136 | 126 |
| | 2.95 | 98 | 136 | 120 |
| | | | | |
| | 17.74 | 550 | 609 | 563 |
| | 7.86 | 235 | 263 | 248 |
| | | | | |
| | 20.80 | 609 | 747 | 661 |
| ¹³⁷ Cs | 10.92 | 323 | 404 | 345 |
| | 9.82 | 266 | 314 | 309 |
| | | | | |
| | | | | |
| ¹³³ Ba | 32.21 | 997 | 1053 | 1026 |
| | 22.33 | 687 | 723 | 710 |
| | 21.23 | 667 | 683 | 677 |
| ¹³³ Ba | | | | |
| | 35.01 | 1098 | 1131 | 115 |
| | 25.13 | 783 | 813 | 798 |
| | 24.03 | 751 | 775 | 763 |
| | | | | |
| | 12.59 | 391 | 408 | 399 |
| | 2.71 | 80 | 98 | 84 |
| | | | | |
| ¹³³ Ba | 53.22 | 1677 | 1717 | 1698 |
| | 43.34 | 1370 | 1392 | 1381 |

rivelatore, le cui caratteristiche sono riportate in Tabella 7.1. Ogni spettro è stato acquisito per 4000 s in modo da ridurre le incertezze associate al canale. I picchi considerati nei calcoli Monte Carlo con le relative ROI (Region Of Interest) per la valutazione dei conteggi persi, sono riportate in Tabella 7.2. Il rapporto tra i conteggi totali nei picchi con energia pari all'energia del picco di assorbimento (E_{FullPeak}) totale meno l'energia dei picchi di fuga K ($E_{\text{Picchi DiFuga}}$) (Tabella 7.1) e i conteggi totali del picco di assorbimento della sorgente (a cui ci si riferisce) corrisponde alla frazione di conteggi che si sarebbero dovuti contare nei canali appartenenti al picco di assorbimento e che invece sono stati contati in canali di energie inferiori ($E_{\text{FullPeak}} - E_{\text{Picchi DiFuga}}$). I dati ottenuti con le relative incertezze sono riassunti in Tabella 7.3.

I dati sperimentali sono stati confrontati con quelli ottenuti dai calcoli Monte Carlo [20]. Entro le incertezze si è ottenuto un buon accordo fra i dati (le incertezze Monte Carlo non sono riportate in quanto dell'ordine del per mille) (Figura 7.2).

Tabella 7.3: Valutazione percentuale della frazione di conteggi persi per i picchi di fuga K del germanio.

| Sorgente | Energia (keV) | Area netta picco | Incertezza assoluta | Incertezza (%) | K _a (9,876 keV) | K _b (10,982 keV) | K _a +K _b | Incertezza (%) |
|-------------------|------------------|---------------------|------------------------|-------------------|-------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------------------|
| ²⁴¹ Am | 59,54 | 6E+05 | 744 | 1,34E-03 | 0,92% | 0,31% | 1% | 2,38E-02 |
| | 49,66 | 5E+03 | 93 | 1,82E-02 | | | | |
| | 48,56 | 2E+03 | 60 | 3,51E-02 | | | | |
| | | | | | | | | |
| | 13,9 | 4E+06 | 12847 | 2,97E-03 | 11,76% | 1,86% | 13,61% | 1,04E-02 |
| | 4,02 | 5E+05 | 3787 | 7,44E-03 | | | | |
| | 2,92 | 8E+04 | 586 | 7,29E-03 | | | | |
| | | | | | | | | |
| | 17,74 | 1E+05 | 740 | 6,72E-03 | 9,09% | | | 3,11E-02 |
| | 7,86 | 1E+04 | 244 | 2,44E-02 | | | | |
| | | | | | | | | |
| | 20,80 | 3E+04 | 239 | 7,60E-03 | 6,29% | 0,67% | 7% | 5,55E-02 |
| | 10,92 | 2E+03 | 82 | 4,16E-02 | | | | |
| | 9,82 | 2E+02 | 23 | 1,07E-01 | | | | |
| | | | | | | | | |
| ¹³³ Ba | 35,01 | 2,00E+06 | 2431 | 1,22E-03 | 2,64% | 0,46% | 3% | 2,34E-02 |
| | 25,13 | 5,28E+04 | 755 | 1,43E-02 | | | | |
| | 24,03 | 9,22E+03 | 620 | 6,73E-02 | | | | |
| | | | | | | | | |
| | 53,22 | 2,68E+05 | 539 | 2,01E-03 | 0,76% | 0,19% | 1% | 6,44E-02 |
| | 43,34 | 2,03E+03 | 127 | 6,24E-02 | | | | |
| | 42,24 | 500 | 31 | 6,24E-02 | | | | |
| | | | | | | | | |
| | 31,02 | 7060000 | 5522 | 7,82E-04 | 3,00% | | | 8,65E-03 |
| | 21,14 | 212000 | 1668 | 7,87E-03 | | | | |
| | | | | | | | | |
| | 30,67 | 3550000 | 3877 | 1,09E-03 | 3,27% | | | 1,09E-02 |
| | 20,794 | 116000 | 1132 | 9,76E-03 | | | | |
| | | | | | | | | |
| ¹³⁷ Cs | 32,21 | 2,51E+04 | 403 | 1,61E-02 | 2,87% | 0,47% | 3% | 8,09E-02 |
| | 22,33 | 7,20E+02 | 33 | 4,52E-02 | | | | |
| | 21,23 | 1,18E+02 | 22 | 1,85E-01 | | | | |

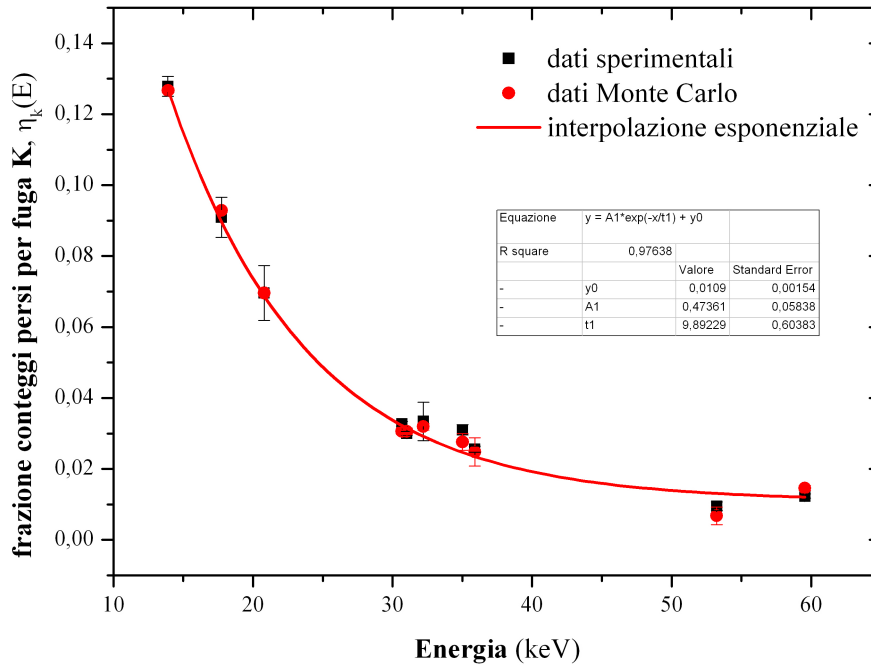


Figura 7.2: *Frazione dei conteggi persi nel picco di assorbimento totale per la presenza dei picchi di fuga K. Confronto tra i dati ottenuti sperimentalmente con sorgenti radioattive sigillate (nero) e dati Monte Carlo (rosso). Curva di interpolazione esponenziale.*

7.6 Curva di efficienza del rivelatore

Per energie inferiori a 50 keV l'efficienza dipende fortemente dalle dimensioni del rivelatore utilizzato. In Figura 7.3 si riporta la curva di efficienza utilizzata nel calcolo degli spettri primari. E' molto importante sottolineare il fatto che è stata necessaria la simulazione per le bassissime energie (< 10 keV), che possono essere molto critiche a causa delle fluorescenze del rivelatore al germanio [21].

Ottenuti i parametri necessari per la risoluzione dell'equazione 7.2 per ogni spettro, partendo dal canale di energia superiore si è corretto il relativo conteggio per la presenza dei picchi di fuga K e poi per l'efficienza $\varepsilon(E)$ del rivelatore. Si è deciso di non correggere per il processo di diffusione Compton in quanto trascurabile nel dominio energetico considerato.

7.7 Confronto tra le distribuzioni degli spettri degli impulsi e gli spettri ricostruiti

Applicando l'equazione 7.2 ad ogni spettro acquisito si sono ottenuti tutti gli spettri realmente incidenti sul rivelatore (vedi Appendice B).

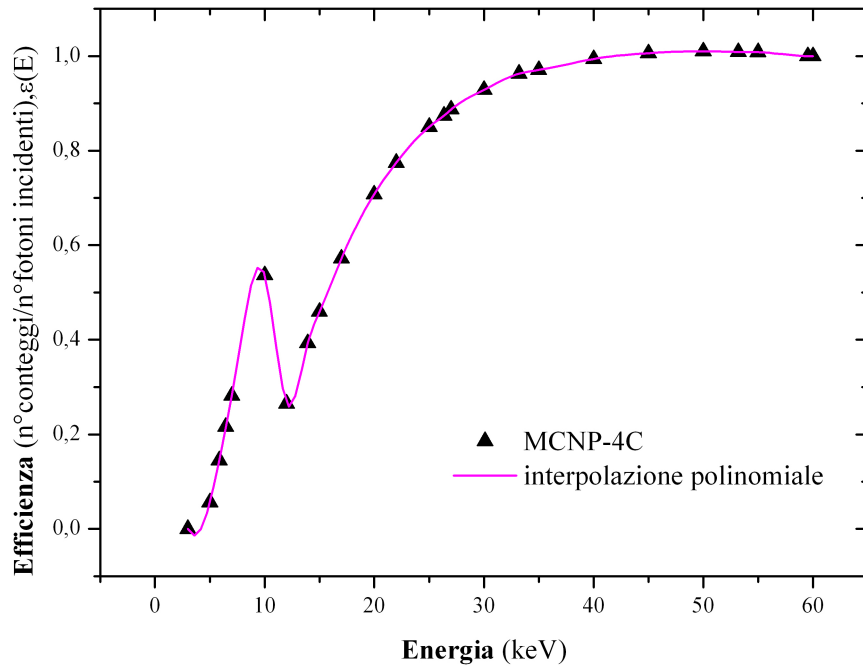


Figura 7.3: Curva di efficienza determinata dalla simulazione del rivelatore al germanio HPGe (i valori sono normalizzati alla riga dell' ^{241}Am a 59,54 keV).

7.8 La matrice risposta del rivelatore

Lo spettro dei conteggi in un rivelatore è abbastanza complesso a causa fondamentalmente dei processi di interazione dei fotoni all'interno del cristallo, come spiegato nei paragrafi precedenti. Inoltre, anche i dispositivi necessari alla rivelazione della radiazione, possono creare distorsioni ed alterazioni nella distribuzione spettrale degli impulsi. Tali distorsioni possono essere attribuite al rumore elettronico, all'efficienza di rivelazione, allo spessore dello strato morto del cristallo, ecc...

Per questo motivo le informazioni che vengono registrate sull'analizzatore multicanale non trovano una reale corrispondenza con la distribuzione energetica dello spettro primario [27, 28]. Per caratterizzare in modo realistico lo spettro incidente sul rivelatore a partire dalla distribuzione degli impulsi (Pulse High Distribution, PHD) è necessario tenere in considerazione tali effetti, come già fatto nel caso della procedura di stripping precedentemente illustrata.

Un metodo alternativo rispetto allo stripping che permette di ricostruire in modo completo dallo spettro degli impulsi lo spettro fotonico incidente sul rivelatore consiste nel deconvolvere lo spettro degli impulsi attraverso l'inversione della matrice risposta del rivelatore ottenuta mediante simulazione Monte Carlo per una fitta serie di energie fotoniche monocromatiche. Questa tecnica di deconvoluzione generalmente conosciuta con il nome di *unfolding* è concettualmente applicata a molte tecniche spettrometriche come, ad esempio, la spettrometria

dei neutroni.

Nel presente lavoro ci si è limitati a verificare la congruenza della matrice risposta calcolata applicandola agli spettri ottenuti dallo stripping per verificare se venivano riottenute le stesse distribuzioni degli impulsi ed inoltre può essere inoltre considerato un metodo indipendente a validazione del metodo di stripping sviluppato per la ricostruzione degli spettri.

Alcuni esempi di risultati, da ritenersi molto soddisfacenti, sono riportati nelle figure 7.4 e 7.5.

Un modo per ottenere la matrice risposta con MCNP, consiste nello studiare la distribuzione degli impulsi prodotta da singoli calcoli per energie monocromatiche [41]. In Figura 7.6 sono rappresentate, in un grafico 3D, tutte le distribuzioni ottenute dai 225 calcoli Monte Carlo da 4 keV a 60 keV, con una scansione pari a 250 eV (si è deciso come limite inferiore di scegliere 4 keV perchè per energie inferiori la distribuzione degli impulsi è affetta da una incertezza anche dell'ordine del 70%). In figura 7.6 sono evidenziate le tre zone che sono state prese in esame anche per valutare la componente del continuo Compton da sottrarre canale per canale alle distribuzioni degli spettri degli impulsi. La zona A contiene i picchi di fuga del germanio, K_α e K_β , la zona B i picchi con energia pari all'energia del picco di assorbimento totale meno quella dei picchi di fuga ed infine la zona C contenente tutti i picchi di assorbimento totale.

Formalmente, il problema della ricostruzione spettrale è rappresentato dalla soluzione di un set di equazioni della forma:

$$\sum_{j=1}^k E_{ij} \cdot S_j = M_j \quad (7.4)$$

$$\text{con } j = 1, m \quad (7.5)$$

dove

E_{ij} = elemento della matrice risposta del sistema;

S_j = elemento j-esimo dello spettro reale;

M_i = valore del segnale misurato dell' i-esimo canale;

k = totale degli intervalli energetici in cui è suddiviso lo spettro;

m = totale canali dello spettro acquisito.

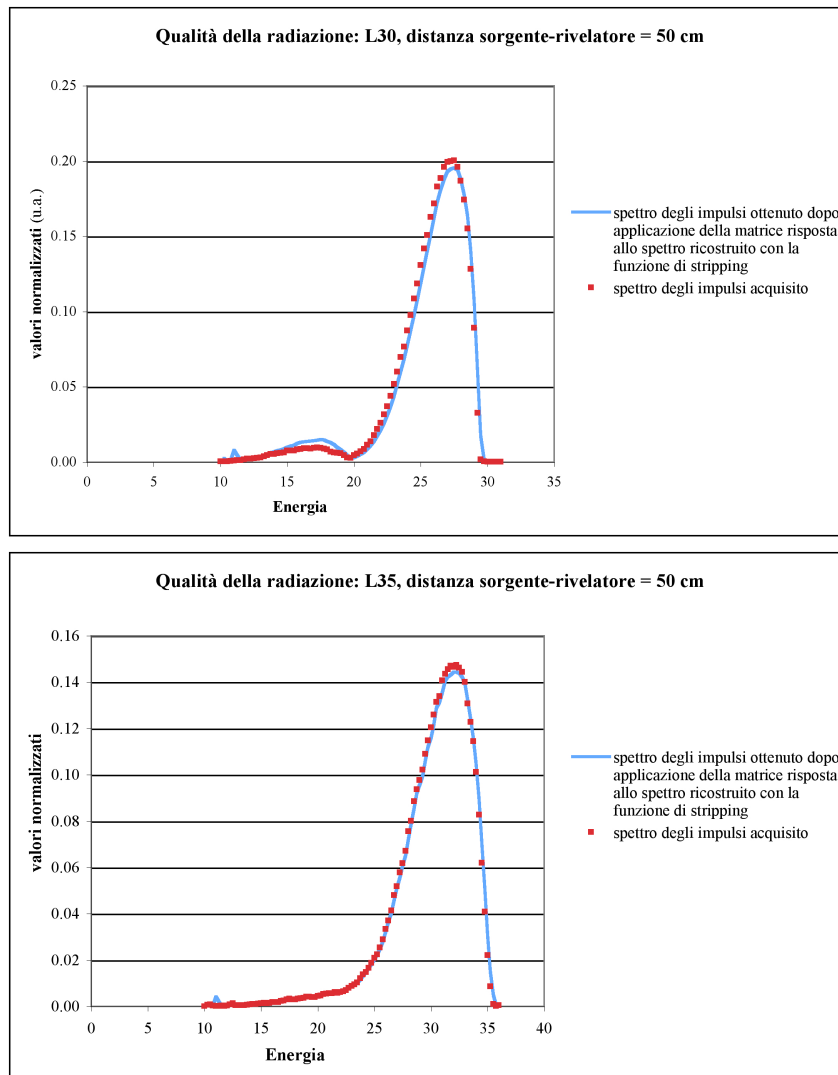


Figura 7.4: Confronto tra gli spettri degli impulsi acquisiti e ottenuti dopo l'applicazione della matrice risposta agli spettri ricostruiti con la funzione di stripping

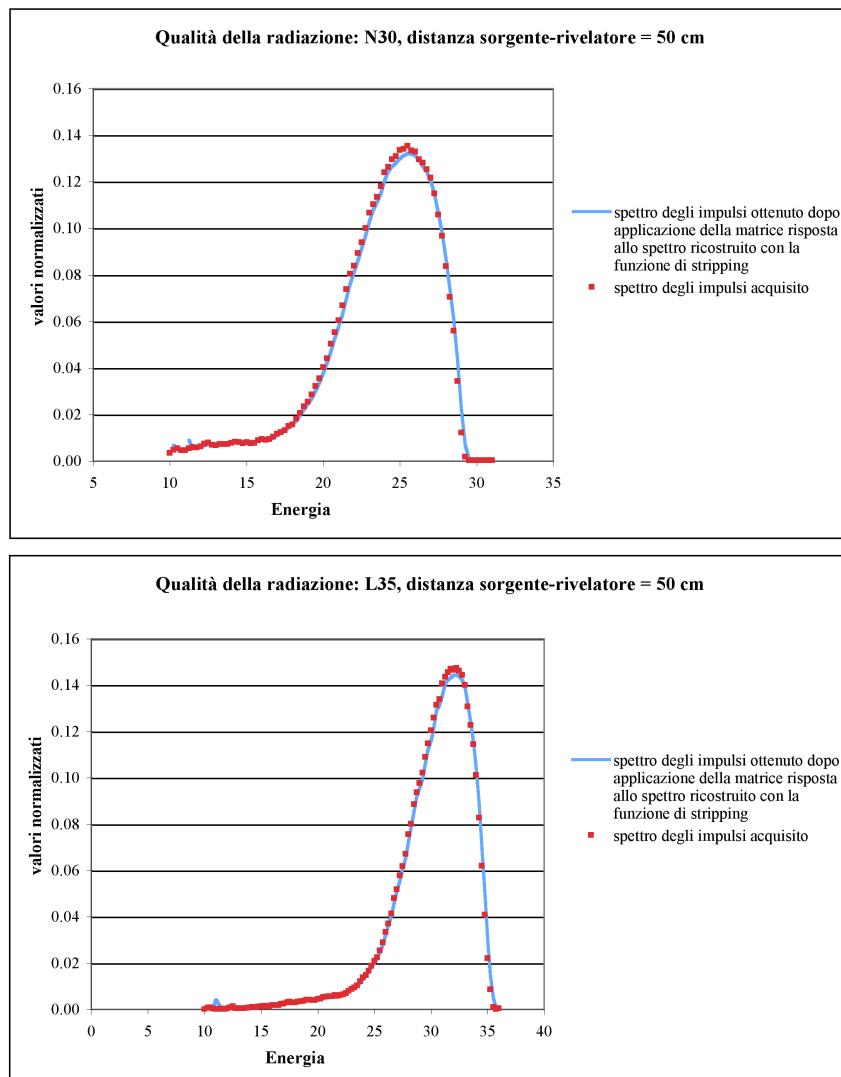


Figura 7.5: Confronto tra gli spettri degli impulsi acquisiti e ottenuti dopo l'applicazione della matrice risposta agli spettri ricostruiti con la funzione di stripping

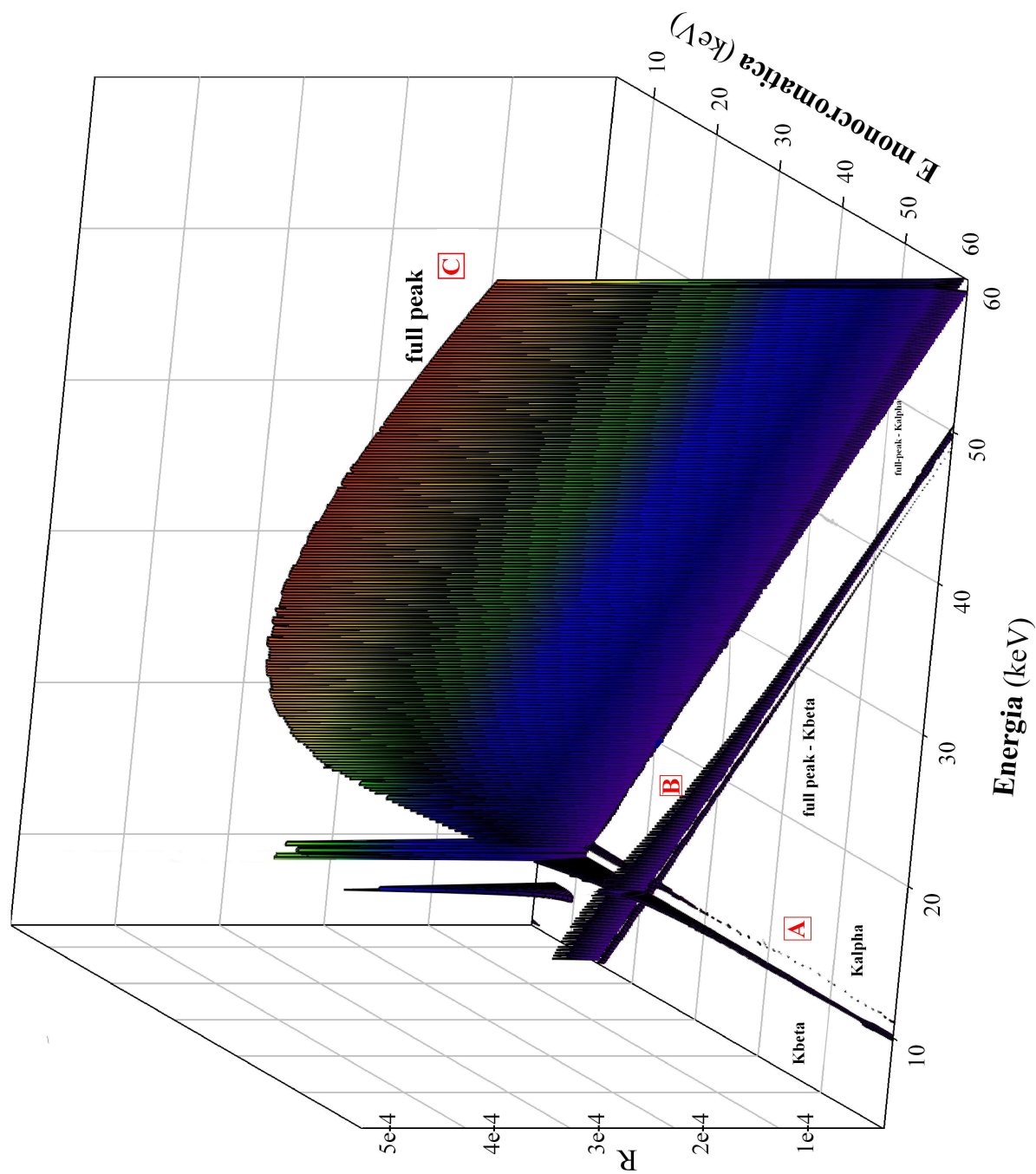


Figura 7.6: La funzione risposta del rivelatore HPGe utilizzato. La matrice è suddivisa in zone: A) picchi di fuga K_α e K_β del germanio, B) picchi con energia pari alla differenza tra l'energia del picco di assorbimento totale e l'energia dei picchi di fuga e C) picchi di assorbimento totale.

Capitolo 8

Determinazione dei coefficienti di conversione fra kerma in aria e grandezze operative per spettri X di bassa energia

8.1 Introduzione

La normativa internazionale ISO 4037(1-4) [1, 4, 5, 6], più volte citata nel corso del lavoro, descrive le tecniche per la calibrazione di dosimetri personali e di strumentazione per radioprotezione impiegando fasci di radiazione X e γ di riferimento.

In particolare, nella ISO 4037-1 [1] sono descritte in modo dettagliato le caratteristiche delle radiazioni X e γ di riferimento da utilizzarsi nella taratura degli strumenti di misura dell'esposizione. Gli spettri sono caratterizzati in termini di primo e secondo spessore emivalente, di energia media e di risoluzione spettrale $\frac{\Delta E}{E}$ (definito come rapporto tra ΔE che rappresenta la larghezza dello spettro in corrispondenza della metà dell'ordinata massima della distribuzione spettrale ed E valore modale dell'energia). I fasci di radiazioni riportati sono suddivisi in quattro gruppi: la serie Low Air-Kerma rate (L), la serie Narrow-Spectrum (N), la serie Wide-Spectrum (W) e la serie High Air-Kerma rate (H) in base alle loro caratteristiche.

La seconda parte ISO 4037-2 [4] descrive la dosimetria dei fasci di radiazioni di riferimento mentre la terza parte ISO 4037-3 [5] presenta le procedure per la calibrazione e determinazione della risposta dei dosimetri e della strumentazione in termini delle grandezze operative ICRU. In particolare la ISO 4037-4 considera le procedure di calibrazione di dosimetri personali e monitori di radioprotezione da impiegare nel campo delle basse energie (tensioni del tubo inferiore a 30 kV).

In base a quanto richiesto dalla normativa ISO 4037-3 [5], la calibrazione di dosimetri personali e di strumentazione per radioprotezione è basata sulla misura della quantità fisica kerma in aria, K_a , sempre al kerma in aria si riferisce la determinazione della loro risposta in funzione dell'energia dei fotoni incidenti e dell'angolo di incidenza in termini di $H_p(d)$.

I valori di $H_p(d)$ si determinano attraverso la conversione di valori misurabili di kerma in aria, K_a , mediante fattori di conversione:

$$H_p(d) = [H_p(d)/k_a] \cdot k_a \quad (8.1)$$

Considerando spettri con una parte considerevole di fotoni con energia inferiore a 10 keV, è stato necessario effettuare calcoli Monte Carlo per energie pari a 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 e 9 keV. La tabulazione ICRU-ICRP ha infatti come limite inferiore i 10 keV. Questo ha permesso di valutare tutti i coefficienti di conversione sugli spettri ricostruiti dei fasci X filtrati (R).

Nel caso di misure di kerma in aria, si assume che, per la calibrazione di dosimetri personali e strumentazione di radioprotezione e test di tipo, differenze negli spettri ottenuti da tubi a raggi X diversi, possano essere considerate trascurabili. Nel caso di $H_p(d)$, invece, tale affermazione è da considerarsi vera solo se le differenze nei coefficienti di conversione determinati da spettri diversi a loro volta generati da impianti diversi, possono considerarsi trascurabili. Questo però non è il caso per gli spettri con una considerevole componente di bassa energia, nei quali i coefficienti di conversione ottenuti da spettri prodotti da impianti diversi possono differire anche del 90% rispetto a quanto riportato dalla normativa o dai documenti di riferimento a causa della forte dipendenza dall'energia. Nasce quindi l'esigenza da parte dei vari Laboratori di Metrologia di caratterizzare i propri fasci di radiazioni, andando a valutare per ognuno di esso i rispettivi coefficienti di conversione.

Nella ISO 4037-3, i coefficienti di conversione da K_a a $H_p(10, \alpha^\circ)$ per fasci di radiazioni di energia inferiore a 30 keV (in particolare per i fasci L20, L30 della serie Low Air-Kerma rate, N15, N20, N25 della serie Narrow-Spectrum e H30 della serie High Air-Kerma rate) sono riportati con a margine la seguente nota

“With these radiation qualities care needs to be taken as variations in energy distribution may have a substantial influence on the numerical values of conversion coefficients”.

Questa nota vuole sottolineare quanto sia importante nella determinazione dei coefficienti di conversione dei fasci X filtrati conoscere la corrispondente distribuzione spettrale in quanto una piccola variazione della stessa può causare una sostanziale differenza sul valore di tali coefficienti.

Si potrebbe pensare che i coefficienti di conversione da kerma in aria, K_a a $H_p(10; R, \alpha^\circ)$ per spettri con energia media bassa siano di poco interesse dosimetrico in quanto definiti come radiazioni debolmente penetranti. Tale affermazione è però solo parzialmente corretta. Secondo la ICRU, infatti, i fotoni con energie molto basse (inferiori a circa 11 keV) sono radiazioni debolmente penetranti e di conseguenza la loro grandezza rappresentativa in termini di equivalente di dose personale è $H_p(0,07)$. D'altro canto esistono spettri con energia media molto bassa ma con un elevato numero di fotoni con energia al di sopra di 11 keV, in questo caso, è comunque necessario calcolare $H_p(10)$ e, spesso, il contributo di fotoni con energie inferiori a 11 keV non può essere trascurato.

Al fine di verificare le misure effettuate ed i metodi di ricostruzione degli spettri impiegati, sono stati determinati i parametri caratteristici di ogni spettro (primo e secondo spessore emivalente, energia media, energia massima, risoluzione, coefficiente di omogeneità) ed infine confrontati con i valori riportati in letteratura [7, 10, 11, 12, 13]. Per ogni fascio di radiazione, R , sono stati poi valutati i coefficienti di conversione da kerma in aria, k_a alle grandezze operative ICRU $H_p(10; R, \alpha^\circ)$, $H_p(0, 07; R, \alpha^\circ)$, $H_p(3; R, \alpha^\circ)$, $H'(0, 07; R, \vec{\Omega})$ e $H^*(10; R)$ per diversi angoli di incidenza $0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ, 45^\circ, 50^\circ, 60^\circ, 70^\circ$ e 80° .

Poiché gli spettri considerati sono, inoltre, fortemente influenzati dalla densità dell'aria, in modo per le basse energie, tutti gli spettri degli impulsi acquisiti prima della ricostruzione sono stati normalizzati alle condizioni di riferimento (temperatura e pressione).

8.2 Considerazioni dimensionali relative allo spettro dei fotoni

Uno spettro di fotoni sorgente, emesso da un tubo a raggi X viene determinato mediante misura con un contatore a stato solido in grado di discriminare in energia la popolazione di fotoni emessi.

La lettura fornita dal multicanale a cui è collegato il rivelatore fornisce quindi uno *yield*, che rappresenta i fotoni appartenenti a ciascun intervallo di energia. Perciò la distribuzione che si misura, dopo aver operato le opportune correzioni (*procedure di stripping*) rappresenta una popolazione fotonica per intervallo di energia dN/dE .

Questa informazione prescinde quindi dalla direzionalità del campo incidente sullo spettrometro ed è quindi legata concettualmente alla quantità fisica denominata *corrente* (J) definita come il numero di particelle che attraversano una superficie (nel caso specifico la finestra del rivelatore) indipendentemente dall'angolo di incidenza.

La considerazione precedente è necessaria in quanto spesso gli spettri dei fotoni vengono riportati da vari Laboratori come spettri in fluenza che è definita in modo sostanzialmente diverso da una popolazione o una corrente di particelle.

Infatti nel Report ICRU 51 [14] la fluenza di particelle è definita come una quantità pesata sull'inverso del coseno dell'angolo di incidenza Θ della radiazione ($\phi = J / \cos \Theta$) e fornisce una informazione sulla potenzialità ionizzante della traccia della particella associata (più l'angolo di incidenza è alto più la traccia compie un percorso maggiore nel rivelatore, maggiore è quindi la sua possibilità di ionizzare).

Nel caso specifico della misura in condizioni metrologiche dello spettro dei fotoni è però possibile assimilare in prima approssimazione lo spettro ottenuto dai conteggi a quello in fluenza in quanto, trattandosi di un campo di radiazione allineato ed espanso e quindi normale alla finestra del rivelatore, le distribuzioni in energia della corrente entrante e quella della rispettiva fluenza si possono considerare uguali essendo il coseno dell'angolo di incidenza Θ pari a 1.

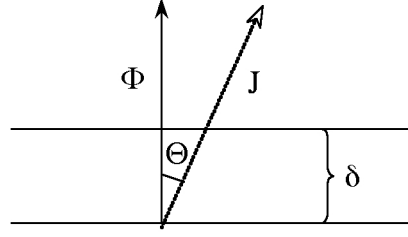


Figura 8.1: Definizione di corrente (J) e fluenza (ϕ).

8.3 Determinazione dei parametri tipici degli spettri

8.3.1 Normalizzazione degli spettri alle condizioni di riferimento

Nella determinazione dei parametri caratteristici degli spettri, ottenuti con il medesimo impianto ma con irraggiamenti non contemporanei, è stato necessario normalizzare i valori ottenuti in differenti condizioni ambientali (temperatura (T), pressione (p) ed umidità relativa (r)) ad identiche condizioni ambientali di riferimento. In particolare nel dominio energetico considerato una variazione della densità dell'aria, ρ , al momento della misura influenza, in modo significativo, la distribuzione spettrale. Per valori di temperatura compresi tra 15°C e 25°C , una buona approssimazione della densità dell'aria, ρ , è data dalla formula di Drake e Böhm [8]:

$$\rho = \rho_0 \left[1,005699 \frac{p}{p_0} - \frac{1}{175,7} \frac{r}{r_0} \left(\frac{T}{T_0} \right)^{17,97} \right] \left(\frac{T}{T_0} \right) \quad (8.2)$$

dove

p è la pressione dell'aria, $p_0 = 101,3$ kPa;

T è la temperatura dell'aria $T_0 = 293,15$ K (equivalente a 20°C);

r è l'umidità relativa dell'aria, $r_0 = 0,65$ (equivalente a 65%);

ρ è la densità dell'aria alle condizioni di riferimento, $\rho_0 = 1.1974$ kg/m³.

Una variazione della densità dell'aria pari all'1% corrisponde ad una variazione nella pressione da 100 kPa a 101 kPa se il valore della temperatura e pressione rimane invariato, oppure ad una variazione nel valore di temperatura da 293 K a 296 K se il valore della pressione e dell'umidità relativa rimane il medesimo. La pressione dell'aria varia sotto i 1000 m da -20% a $+10\%$ circa. Gli spettri sono stati riportati alle stesse condizioni ambientali nelle quali si sono effettuate le misure di spessori emivalenti con camera a ionizzazione usando la seguente legge di attenuazione esponenziale:

$$C_E(E) = C_{E,m}(E) \cdot \exp [- (\mu(E)/\rho_0) d(\rho_0 - \rho)] \quad (8.3)$$

dove

E è l'energia del fotone;

$C_E(E)$ sono i conteggi del canale i -esimo corrispondenti all'energia E alle condizioni di riferimento;

$C_{E,m}(E)$ sono i conteggi al momento dell'acquisizione dello spettro;
 $\mu(E)/\rho_0$ è il coefficiente di attenuazione massico dell'aria tabulato da Hubble et al. [9];

d è la distanza tra il rivelatore ed il punto di emissione della radiazione (50 cm o 200 cm).

8.3.2 Determinazione del primo e secondo spessore emivalente

Per verificare le misure effettuate con la camera a ionizzazione ad aria libera (metodo dosimetrico) e la correttezza del metodo impiegato per la ricostruzione degli spettri sono stati calcolati il primo ed il secondo spessore emivalente (I° e II° SEV) per ogni spettro ricostruito, alle 2 distanze rivelatore-sorgente di radiazione rispettivamente pari a 50 cm e 200 cm.

Per scopi dosimetrici è conveniente descrivere il campo di radiazioni in termini di intensità di kerma per un opportuno materiale (aria o tessuto). Per calcolare tutti i parametri caratteristici dello spettro ad eccezione dell'energia media dei fotoni \bar{E}_{media} , gli spettri sono stati pesati per il corrispondente fattore di kerma $k(E)$ ¹ monoenergetico definito come:

$$k(E) = E \cdot \frac{\mu_{\text{tr}}}{\rho} \quad (8.4)$$

I valori di (μ_{tr}/ρ) sono riassunti nelle tabelle riportate da Hubbel et al. [9] ed interpolati con funzione Lagrangiana in modo da ottenere una funzione continua utile agli scopi.

Il primo spessore emivalente è definito come quello spessore in grado di attenuare il fascio di radiazione in esame fino a ridurne il rateo di esposizione alla metà del valore originario, con esclusione della radiazione diffusa ad eccezione di quella già contenuta nel fascio originario. Il secondo spessore emivalente è invece quello spessore, di un determinato materiale, che aggiunto al primo riduce il rateo di kerma da un mezzo ad un quarto del valore originario.

¹Il coefficiente di trasferimento di energia massico è definito come:

$$\frac{\mu_{\text{tr}}}{\rho} = \frac{1}{\rho EN} \frac{dE_{\text{tr}}}{dl}$$

dove dE_{tr}/EN rappresenta appunto la frazione dell'energia dei fotoni incidenti trasferita in energia cinetica alle particelle cariche secondarie a causa delle interazioni subite nel tratto dl del mezzo di densità ρ . Alcuni laboratori ([12]) hanno usato nella determinazione dei parametri caratteristici dei loro spettri il coefficiente di assorbimento di energia massico, (μ_{en}/ρ) , in quanto nel dominio energetico di interesse le differenze possono considerarsi trascurabili. I valori di (μ_{tr}/ρ) e (μ_{en}/ρ) sono, infatti, apprezzabilmente diversi soltanto quando le energie delle particelle cariche secondarie sono molto maggiori delle loro particelle di quiete, specialmente in materiali ad elevato numero atomico. Il coefficiente di assorbimento di energia massico è definito come:

$$\frac{\mu_{\text{en}}}{\rho} = \frac{\mu_{\text{tr}}}{\rho} (1 - g)$$

avendo indicato con g la frazione di energia che i secondari cariche dissipano in radiazione di frenamento nel materiale di interesse (Brehmsstrahlung).

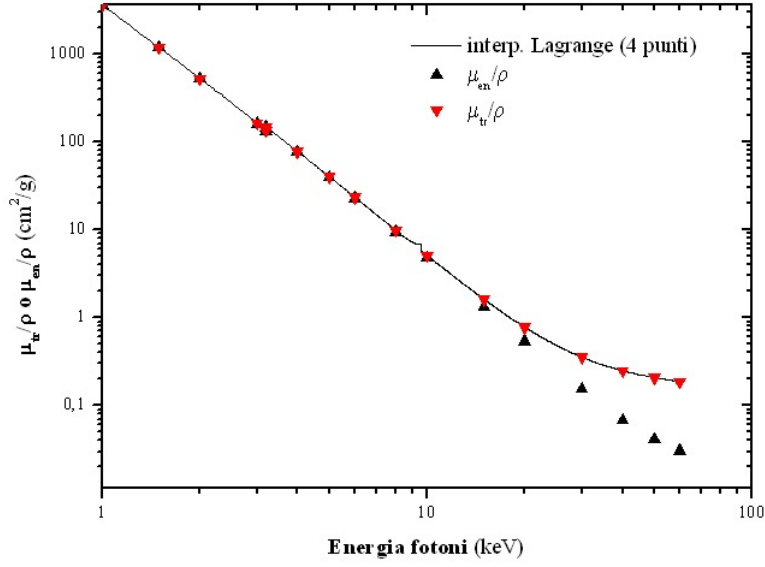


Figura 8.2: Coefficiente di trasferimento e assorbimento di energia massico dell'aria (scala log-log).

Essendo l'attenuazione di un fascio di fotoni da parte di un materiale di spessore, d , descritta tramite una semplice legge esponenziale, il primo e secondo spessore emivalente possono essere calcolati mediante la seguente formula:

$$\int_0^{E_{max}} C_E^*(E) \cdot k(E) dE = \int_0^{E_{max}} C_E(E) \cdot k(E) \cdot \exp\left(-\left(\frac{\mu(E)}{\rho}\right) \cdot \rho d\right) dE \quad (8.5)$$

dove $C_E(E)$ e $C_E^*(E)$ sono lo spettro ricostruito in kerma prima e dopo lo spessore di attenuazione. $(\mu(E)/\rho)$ è il coefficiente di assorbimento di energia massico dell'alluminio (materiale utilizzato per i filtri addizionali), ρ la densità dell'alluminio e d lo spessore del filtro.

I valori di primo e secondo spessore emivalente sono riassunti in Tabella 8.1, 8.2 e 8.3 rispettivamente per i fasci X filtrati della serie L, N e H.

8.3.3 Determinazione dell'energia media dello spettro ricostruito

L'energia media di ogni spettro ricostruito è stata calcolata come segue:

$$\overline{E}_{media} = \frac{\int_0^{E_{max}} E \cdot C_E(E) dE}{\int_0^{E_{max}} C_E(E) dE} \quad (8.6)$$

dove $C_E(E)$ è lo spettro ricostruito (in conteggi) ed E_{max} l'energia massima dello spettro.

I valori di E_{max} e E_{media} sono riassunti in Tabella 8.1, 8.2 e 8.3 rispettivamente per i fasci X filtrati della serie L, N e H.

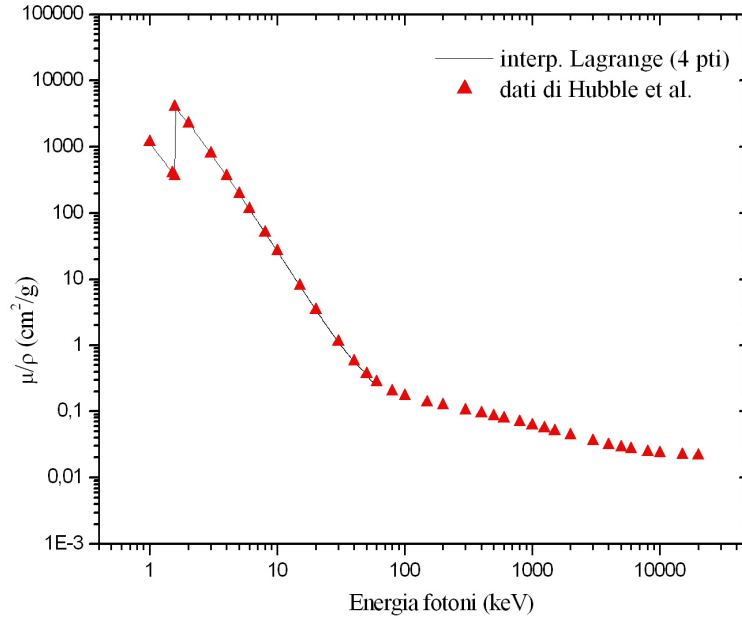


Figura 8.3: *Coefficiente di assorbimento di energia massico dell'alluminio.*

8.3.4 Fattore di Kerma

Il fattore di Kerma, $k(R)$, è definito come il rapporto tra il totale di KERMA in aria, k_a , ed il totale dei conteggi dello spettro ricostruito.

E' data dalla seguente equazione:

$$k(R) = \frac{\int_0^{E_{max}} k(E) \cdot C_E(E) dE}{\int_0^{E_{max}} C_E(E) dE} \quad (8.7)$$

dove $C_E(E)$ è lo spettro ricostruito (in conteggi), E_{max} l'energia massima dello spettro e $k(E)$ fattore di kerma monoenergetico definito precedentemente..

I dati caratteristici di ogni fascio di radiazione (energia media, energia massima, primo e secondo spessore emivalente, fattore di kerma) calcolati come descritto nei precedenti paragrafi sono riassunti per ogni qualità di radiazione considerata nelle tabelle di seguito riportate.

8.4 I coefficienti di conversione

I coefficienti di conversione per energie monocromatiche di fotoni sono disponibili per energie superiori a 10 keV nella pubblicazione ICRP 74 [17], nel Report ICRU 57 [2] e nella ISO 4037-3 [5] per diversi angoli di incidenza. Per ottenere tali coefficienti per energie inferiori a quelle riportate, indispensabili per la deter-

Tabella 8.1: Dati caratteristici della serie “Low Air-Kerma Rate series” (L): energia media (E_{media}), energia massima (E_{max}), primo e secondo spessore emivalente (I° e II° SEV), fattore di kerma ($k(R)$). (a) Distanza sorgente - punto di misura = 50 cm. (b) Distanza sorgente - punto di misura = 200 cm.

| | E_{media} (keV) | E_{max} (keV) | I° SEV (mm) | II° SEV (mm) | Coefficiente di omogeneità | Risoluzione (%) | $k(R)$ (pGy·cm ²) |
|-----|----------------------|--------------------|-----------------------|------------------------|----------------------------------|--------------------|----------------------------------|
| L10 | 8,2 | 9,4 | 0,057 | 0,058 | 0,98 | 19 | 12,29 |
| L20 | 16,1 | 18,4 | 0,40 | 0,41 | 0,98 | 19 | 3,51 |
| L30 | 26,1 | 29,5 | 1,51 | 1,55 | 0,97 | 18 | 1,89 |
| L35 | 30,5 | 35,4 | 2,28 | 2,30 | 0,99 | 21 | 1,71 |

| | E_{media} (keV) | E_{max} (keV) | I° SEV (mm) | II° SEV (mm) | Coefficiente di omogeneità | Risoluzione (%) | $k(R)$ (pGy·cm ²) |
|-----|----------------------|--------------------|-----------------------|------------------------|----------------------------------|--------------------|----------------------------------|
| L10 | 8,5 | 9,4 | 0,06 | 0,06 | 1,00 | 18 | 11,6 |
| L20 | 16,2 | 19,5 | 0,44 | 0,48 | 0,92 | 19 | 3,52 |
| L30 | 26,1 | 29,5 | 1,57 | 1,63 | 0,96 | 18 | 1,89 |
| L35 | 30,3 | 35,4 | 2,25 | 2,27 | 0,99 | 22 | 1,72 |

Tabella 8.2: Dati caratteristici della serie “Narrow-Spectrum” (N): energia media (E_{media}), energia massima (E_{max}), primo e secondo spessore equivalente (I° e II° SEV), fattore di kerma ($k(R)$). (a) Distanza sorgente - punto di misura = 50 cm. (b) Distanza sorgente - punto di misura = 200 cm.

| | E_{media} (keV) | E_{max} (keV) | I° SEV (mm) | II° SEV (mm) | Coefficiente di omogeneità | Risoluzione (%) | $k(R)$ (pGy·cm ²) |
|-----|----------------------|--------------------|-----------------------|------------------------|----------------------------------|--------------------|----------------------------------|
| N10 | 8,2 | 9,3 | 0,048 | 0,053 | 0,91 | 27 | 12,38 |
| N15 | 11,7 | 14,5 | 0,14 | 0,16 | 0,88 | 28 | 6,46 |
| N20 | 15,3 | 18,9 | 0,32 | 0,35 | 0,91 | 32 | 3,98 |
| N25 | 19,4 | 24,6 | 0,66 | 0,74 | 0,89 | 30 | 1,78 |
| N30 | 24,0 | 29,2 | 1,15 | 1,27 | 0,91 | 30 | 2,07 |
| N40 | 33,5 | 40,0 | 2,80 | 2,97 | 0,94 | 28 | 1,66 |

| | E_{media} (keV) | E_{max} (keV) | I° SEV (mm) | II° SEV (mm) | Coefficiente di omogeneità | Risoluzione (%) | $k(R)$ (pGy·cm ²) |
|-----|----------------------|--------------------|-----------------------|------------------------|----------------------------------|--------------------|----------------------------------|
| N10 | 8,4 | 9,3 | 0,056 | 0,063 | 0,89 | 27 | 11,93 |
| N15 | 11,9 | 14,5 | 0,16 | 0,17 | 0,94 | 28 | 6,15 |
| N20 | 15,5 | 18,9 | 0,34 | 0,36 | 0,94 | 32 | 3,81 |
| N25 | 19,3 | 24,5 | 0,67 | 0,75 | 0,89 | 30 | 1,78 |
| N30 | 23,8 | 29,2 | 1,22 | 1,24 | 0,98 | 30 | 2,10 |
| N40 | 33,2 | 40,0 | 2,80 | 3,04 | 0,92 | 28 | 1,66 |

Tabella 8.3: Dati caratteristici della serie “High Air-Kerma Rate” (H): energia media (E_{media}), energia massima (E_{max}), primo e secondo spessore equivalente (I° e II° SEV), fattore di kerma ($k(R)$). (a) Distanza sorgente - punto di misura = 50 cm. (b) Distanza sorgente - punto di misura = 200 cm.

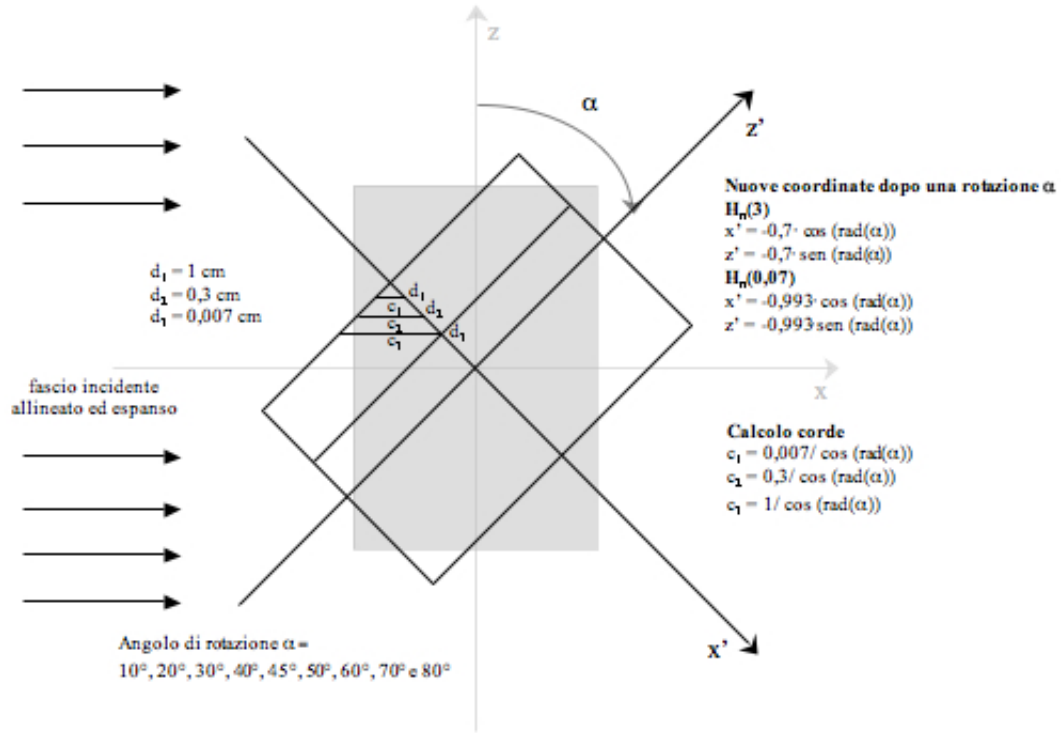
| | E_{media} (keV) | E_{max} (keV) | I° SEV (mm) | II° SEV (mm) | Coefficiente di omogeneità | Risoluzione (%) | $k(R)$ (pGy·cm ²) |
|------------|----------------------|--------------------|-----------------------|------------------------|----------------------------------|--------------------|----------------------------------|
| H10 | 7,7 | 10,4 | 0,04 | 0,04 | 0,974 | 52 | 15,40 |
| H20 | 11,9 | 20,2 | 0,12 | 0,15 | 0,800 | 89 | 8,61 |
| H30 | 19,9 | 30,1 | 0,36 | 0,58 | 0,621 | 70 | 3,05 |
| H60 | 38,2 | 59,9 | 2,4 | 3,48 | 0,689 | 76 | 1,70 |

| | E_{media} (keV) | E_{max} (keV) | I° SEV (mm) | II° SEV (mm) | Coefficiente di omogeneità | Risoluzione (%) | $k(R)$ (pGy·cm ²) |
|------------|----------------------|--------------------|-----------------------|------------------------|----------------------------------|--------------------|----------------------------------|
| H10 | 8,6 | 10,4 | 0,050 | 0,065 | 0,77 | 45 | 11,78 |
| H20 | 13,3 | 20,2 | 0,145 | 0,192 | 0,76 | 82 | 5,72 |
| H30 | 20,1 | 30,1 | 0,41 | 0,60 | 0,68 | 75 | 2,90 |
| H60 | 37,3 | 59,9 | 2,50 | 3,34 | 0,75 | 78 | 1,73 |

minazione dei coefficienti di conversione delle qualità di radiazioni considerate, sono stati effettuati calcoli Monte Carlo [10, 13].

In figura 8.4 si riporta una immagine schematica della situazione che è stata simulata a tale scopo: è stato considerato un fantoccio a slab di dimensioni $30 \times 30 \times 15 \text{ cm}^3$ di tessuto ICRU. Una volta ottenuti dai calcoli Monte Carlo i valori di H_p/ϕ rispettivamente per $H_p(0,07)$, $H_p(3)$ e $H_p(10)$ per incidenza normale del fascio di radiazione (0°), sono stati ottenuti successivamente i valori dei coefficienti di conversione per le stesse grandezze in funzione degli angoli di incidenza (10° , 20° , 30° , 40° , 45° , 50° , 60° , 70° e 80°). A tale scopo sono state applicati analiticamente fattori di attenuazione esponenziali dipendenti dalle lunghezze delle corde c_1 , c_2 e c_3 , funzioni delle tre profondità e del rispettivo angolo di rotazione α [16].

L'assunzione fatta implica che si consideri l'effetto fotoelettrico come dominante rispetto alla diffusione incoerente nel dominio di energia studiato. Tale assunzione è senz'altro valida, per cui si può considerare del tutto trascurabile il contributo di *build-up* dovuto alla piccolissima frazione di fotoni diffusa nello slab tessuto equivalente.



| | $H_n(0,07)$ | $H_n(3)$ | $H_n(10)$ |
|------------|-----------------|---------------------------------|---------------------------------|
| 0° | $c_1(0^\circ)$ | $c_2(0^\circ) - c_1(0^\circ)$ | $c_3(0^\circ) - c_1(0^\circ)$ |
| 10° | $c_1(10^\circ)$ | $c_2(10^\circ) - c_1(10^\circ)$ | $c_3(10^\circ) - c_1(10^\circ)$ |
| 20° | $c_1(20^\circ)$ | $c_2(20^\circ) - c_1(20^\circ)$ | $c_3(20^\circ) - c_1(20^\circ)$ |
| ... | ... | ... | ... |
| 80° | $c_1(80^\circ)$ | $c_2(80^\circ) - c_1(80^\circ)$ | $c_3(80^\circ) - c_1(80^\circ)$ |

Figura 8.4: Rappresentazione schematica della geometria e della procedura impiegata per i calcoli dei coefficienti di conversione monenergetici.

8.4.1 Coefficienti di conversione $h(10; R, \alpha^\circ)$ per il fantoccio a slab

Per ogni qualità di radiazione in esame sono stati calcolati i corrispondenti coefficienti di conversione $h(10; R, \alpha^\circ)$ per diversi angoli di incidenza α° tra la direzione del campo fotonico di calibrazione e la normale alla superficie frontale del fantoccio.

I coefficienti di conversione $h(10; R, \alpha^\circ)$ per ogni qualità di radiazione, R , considerata nel dominio energetico di interesse e angolo di incidenza α sono stati determinati applicando la seguente equazione:

$$h(10; R, \alpha^\circ) = \frac{\int_0^{E_{max}} C_E(E) \cdot k(E) \cdot h(10; E, \alpha^\circ) dE}{\int_0^{E_{max}} C_E(E) \cdot k(E) dE} \quad (8.8)$$

La distribuzione spettrale di ogni qualità di radiazione, in particolare quelle

Tabella 8.4: *Coefficienti di conversione $h(10; E, \alpha^\circ)$ in Sv/Gy per diversi angoli di incidenza*

| Energia (keV) | Angolo di incidenza α° | | | | | | | | | |
|------------------|------------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| | 0° | 10° | 20° | 30° | 40° | 45° | 50° | 60° | 70° | 80° |
| 2 | | | | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | | | | |
| 4 | $< 1 \cdot 10^{-6}$ | $< 1 \cdot 10^{-6}$ | | | | | | | | |
| 5 | | | $< 1 \cdot 10^{-6}$ | $< 1 \cdot 10^{-6}$ | $< 1 \cdot 10^{-6}$ | $< 1 \cdot 10^{-6}$ | $< 1 \cdot 10^{-6}$ | $< 1 \cdot 10^{-6}$ | $< 1 \cdot 10^{-6}$ | $< 1 \cdot 10^{-6}$ |
| 6 | | | | | | | | | | |
| 7 | | | | | | | | | | |
| 8 | $1.19 \cdot 10^{-5}$ | $1.01 \cdot 10^{-5}$ | | | | | | | | |
| 9 | $5.51 \cdot 10^{-4}$ | $4.94 \cdot 10^{-4}$ | $3.51 \cdot 10^{-4}$ | $1.86 \cdot 10^{-4}$ | $6.45 \cdot 10^{-5}$ | $1.35 \cdot 10^{-5}$ | | | | |
| 10* | $1.10 \cdot 10^{-2}$ | $1.01 \cdot 10^{-2}$ | $7.77 \cdot 10^{-3}$ | $4.78 \cdot 10^{-3}$ | $2.13 \cdot 10^{-3}$ | $4.80 \cdot 10^{-4}$ | $2.23 \cdot 10^{-4}$ | $2.02 \cdot 10^{-5}$ | | |
| 15* | $2.78 \cdot 10^{-1}$ | $2.71 \cdot 10^{-1}$ | $2.50 \cdot 10^{-1}$ | $2.14 \cdot 10^{-1}$ | $1.66 \cdot 10^{-1}$ | $8.79 \cdot 10^{-2}$ | $6.90 \cdot 10^{-2}$ | $3.23 \cdot 10^{-2}$ | $6.66 \cdot 10^{-2}$ | $5.24 \cdot 10^{-5}$ |

* i valori a 10 e 15 keV sono i accordo con i dati pubblicati sulla ISO 4037-3 entro un fattore $\pm 5\%$.

che presentano numerosi fotoni di bassa energia, dipende in modo significativo dalla filtrazione totale del fascio (spessore dei filtri, spessore dell'aria, densità dell'aria, ecc.) e dalle caratteristiche dell'impianto utilizzato (inclinazione dell'anodo, materiale di cui è composta la finestra, stabilità della tensione, ecc.). Inoltre i coefficienti di conversione monoenergetici $h(10; E, \alpha^\circ)$ sono fortemente dipendenti dall'energia, soprattutto per quei fasci che presentano una quantità non trascurabile di fotoni di bassa energia. Questo implica che i valori dei coefficienti di conversione ottenuti dagli spettri ricostruiti possano differire anche fino al 100% da valori ottenuti da spettri prodotti da impianti diversi e, nel caso in cui si sia utilizzata la medesima facility, a causa di una variazione della densità dell'aria o dello spessore d'aria tra la sorgente ed il punto di misura.

8.4.2 Coefficienti di conversione $h(0, 07; R, \alpha)$ per la pelle

La ISO 4037-3 [5] riporta un paragrafo in cui viene discussa l'influenza della variazione dell'angolo di rotazione del fantoccio sul valore di $H_p(0, 07)$. Per un angolo di rotazione pari a 60° il valore di $h(0, 07; E, 60)/h(0, 07; E, 0)$ in funzione dell'energia dei fotoni rimane compreso fra 0,95 e 1,05 del valore normale di incidenza [15, 16]. Per angoli inferiori a 60° queste variazioni risultano ancora più trascurabili, per questo motivo nella normativa si assume che per il fantoccio a polso $H_p(0, 07)$ risulta indipendente dalla direzione di incidenza della radiazione.

Nel presente lavoro sia a verifica di quanto riportato nella normativa di riferimento sia avendo necessità di spingersi ad energie inferiori a 7 keV, si sono valutati i coefficienti di conversione $h(0, 07; R, \alpha)$ per i seguenti angoli di incidenza $0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ, 45^\circ, 50^\circ, 60^\circ, 70^\circ$ e 80° . L'angolo di incidenza α è formato dal campo di fotoni monodirezionali e la normale alla superficie del fantoccio (perpendicolare all'asse longitudinale del fantoccio).

In Tabella 8.5 sono riportati i coefficienti di conversione monoenergetici $h(0, 07; E, \alpha)$ normalizzati a 0° ottenuti dai calcoli Monte Carlo e graficati in Figura 8.5.

Tabella 8.5: *Coefficienti di conversione $h(0,07; E, \alpha^\circ)$ in Sv/Gy per diversi angoli di incidenza*

| Energia (keV) | Angolo di incidenza α° | | | | | | | | | |
|------------------|------------------------------------|------|------|------|------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| | 0° | 10° | 20° | 30° | 40° | 45° | 50° | 60° | 70° | 80° |
| 2 | 0,02 | 0,02 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | $< 1 \cdot 10^{-2}$ | $< 1 \cdot 10^{-2}$ | $< 1 \cdot 10^{-3}$ | $< 1 \cdot 10^{-2}$ | $< 1 \cdot 10^{-2}$ |
| 3 | 0,30 | 0,30 | 0,28 | 0,25 | 0,20 | 0,18 | 0,15 | 0,08 | 0,03 | $< 1 \cdot 10^{-2}$ |
| 4 | 0,57 | 0,57 | 0,55 | 0,52 | 0,48 | 0,45 | 0,41 | 0,32 | 0,19 | 0,04 |
| 5 | 0,75 | 0,74 | 0,73 | 0,71 | 0,68 | 0,66 | 0,63 | 0,55 | 0,42 | 0,18 |
| 6 | 0,84 | 0,84 | 0,83 | 0,82 | 0,80 | 0,78 | 0,76 | 0,71 | 0,60 | 0,37 |
| 7 | 0,89 | 0,89 | 0,89 | 0,89 | 0,88 | 0,88 | 0,88 | 0,88 | 0,87 | 0,86 |
| 8 | 0,92 | 0,92 | 0,92 | 0,92 | 0,91 | 0,91 | 0,91 | 0,90 | 0,90 | 0,90 |
| 9 | 0,94 | 0,94 | 0,94 | 0,93 | 0,93 | 0,93 | 0,93 | 0,92 | 0,92 | 0,92 |
| 10* | 0,97 | 0,97 | 0,97 | 0,96 | 0,96 | 0,96 | 0,95 | 0,93 | 0,90 | 0,81 |
| 15* | 0,97 | 0,97 | 0,97 | 0,97 | 0,97 | 0,97 | 0,97 | 0,96 | 0,95 | 0,92 |

* i valori a 10 e 15 keV sono i accordo con i dati pubblicati sulla ISO 4037-3 entro un fattore $\pm 5\%$.

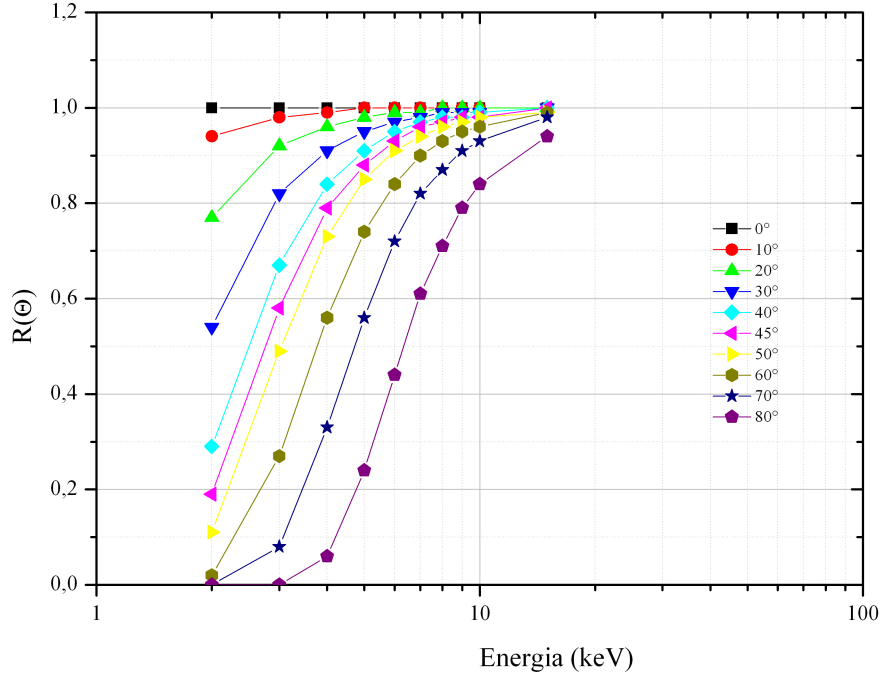


Figura 8.5: Andamento del coefficiente di conversione $R(\Theta) = h(0,07; E, \alpha)/h(0,07; E, 0)$ in funzione dell'angolo α e dell'energia del fotone E .

I coefficienti di conversione $h(0,07; R, \alpha^\circ)$ per ogni qualità di radiazione, R , considerata nel dominio energetico di interesse e angolo di incidenza α sono stati determinati applicando la seguente equazione:

$$h(0,07; R, \alpha^\circ) = \frac{\int_0^{E_{max}} C_E(E) \cdot k(E) \cdot h(0,07; E, \alpha^\circ) dE}{\int_0^{E_{max}} C_E(E) \cdot k(E) dE} \quad (8.9)$$

A differenza dei coefficienti di conversione monoenergetici $h(10; E, \alpha)$, i coefficienti di conversione $h(0,07; E, \alpha)$ non dipendono fortemente dall'energia; di conseguenza, differenze nella distribuzione spettrale dovute a diverse facility o a variazioni dei parametri ambientali, influenzano i valori di $h_{pk}(0,07; R, \alpha)$ in modo pressochè trascurabile. Quindi al fine di valutare $H_p(0,07)$ è possibile applicare come coefficiente di conversione $h_{pk}(0,07; R, \alpha)$ anche un valore ottenuto da un impianto diverso da quello usato per la calibrazione o direttamente quanto riportato sulla normativa di riferimento.

8.4.3 Coefficienti di conversione $h(3; R, \alpha^\circ)$

Le raccomandazioni internazionali ICRU 47 [17] e ICRU 51 [14] definiscono l'equivalente di dose personale $H_p(3)$ come la grandezza operativa indicata per la dosimetria al cristallino. Essendo una grandezza ancora alquanto discussa, al momento i coefficienti di conversione monoenergetici $H_p(3)/K_a$ sono stati valutati solo dal GSG (Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit) di Monaco [15], mediante simulazioni Monte Carlo su di un fantoccio teorico $30 \times 30 \times 15$

cm³ - 4 elementi ICRU per varie energie e angoli di incidenza e da ENEA-IRP per un fantoccio ridotto meglio rappresentativo delle reali dimensioni della testa. In base ai valori riportati dal GSF per energie superiori a 10 keV ($E > 10$ keV) e ai valori ottenuti con simulazioni Monte Carlo per energie inferiori a 10 keV è stato possibile calcolare i coefficienti di conversione $h(3; R, \alpha^\circ)$ sugli spettri ricostruiti.

I valori dei coefficienti di conversione monoenergetici ottenuti sono riassunti in sono riassunti in Tabella 8.6.

I coefficienti di conversione $h(3; R, \alpha^\circ)$ per ogni qualità di radiazione, R , considerata nel dominio energetico di interesse e angolo di incidenza α sono stati determinati applicando la seguente equazione:

$$h(3; R, \alpha^\circ) = \frac{\int_0^{E_{max}} C_E(E) \cdot k(E) \cdot h(3; E, \alpha^\circ) dE}{\int_0^{E_{max}} C_E(E) \cdot k(E) dE} \quad (8.10)$$

8.4.4 Coefficienti di conversione $h^*(10; R)$

Le grandezze operative definite dalla ICRU, riportate nella ICRU 51 [14] sono: per la dosimetria ambientale, l'equivalente di dose ambientale, H^* e l'equivalente di dose direzionale, H' .

Nella Pubblicazione ICRU 57 [2] e nella ISO 4037-3 [5] sono riportati i coefficienti di conversione $h^*(10; E)$ per fotoni di energia inferiore a 10 keV (E_{ISO}). Per ottenere i coefficienti di conversione monoenergetici per $E < E_{ISO}$ è stata applicata la seguente equazione di attenuazione:

$$h^*(10; E < E_{ISO}) = h^*(10; E_{ISO}) \cdot \frac{\exp\left(-\left(\frac{\mu(E)}{\rho}\right) \cdot \rho_{ICRU} \cdot d\right)}{\exp\left(-\left(\frac{\mu(E_{ISO})}{\rho}\right) \cdot \rho_{ICRU} \cdot d\right)} \quad (8.11)$$

dove $(\mu(E)/\rho)_{ISO,E}$ è il coefficiente di assorbimento massico monoenergetico del tessuto ICRU, $d = 10$ mm e $\rho_{ICRU} = 1,0$ cm³ densità della sfera ICRU.

I risultati ottenuti sono riassunti in Tabella 8.7.

Al fine di ottenere una funzione continua di $h^*(10; E)$ da applicare per la valutazione di $h^*(10; R)$ mediante l'equazione è stata fatta una interpolazione lagrangiana (4 punti) (Figura 8.6).

I coefficienti di conversione $h^*(10; R)$ per ogni qualità di radiazione, R , considerata nel dominio energetico di interesse sono stati determinati applicando la seguente equazione:

$$h^*(10; R) = \frac{\int_0^{E_{max}} C_E(E) \cdot k(E) \cdot h^*(10; E) dE}{\int_0^{E_{max}} C_E(E) \cdot k(E) dE} \quad (8.12)$$

Come i coefficienti di conversione monoenergetici $h(10; E, \alpha^\circ)$ anche i coefficienti $h^*(10; E)$ sono fortemente dipendenti dall'energia, soprattutto per fotoni di bassa energia. Questo comporta che i coefficienti di conversione calcolati sugli spettri ricostruiti possano differire anche del 100% da un impianto ad un altro e, nel caso in cui si utilizzi la medesima facility, si possono riscontrare differenze

Tabella 8.6: *Coefficienti di conversione $h(3; E, \alpha^\circ)$ in Sv/Gy per diversi angoli di incidenza*

| Energia (keV) | Angolo di incidenza α° | | | | | | | | | |
|------------------|------------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|---------------------|
| | 0° | 10° | 20° | 30° | 40° | 45° | 50° | 60° | 70° | 80° |
| 2 | | | | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | | | | |
| 4 | $< 1 \cdot 10^{-6}$ | $< 1 \cdot 10^{-6}$ | $< 1 \cdot 10^{-6}$ | $< 1 \cdot 10^{-6}$ | $< 1 \cdot 10^{-6}$ | $< 1 \cdot 10^{-6}$ | $< 1 \cdot 10^{-6}$ | $< 1 \cdot 10^{-6}$ | $< 1 \cdot 10^{-6}$ | $< 1 \cdot 10^{-6}$ |
| 5 | | | | | | | | | | |
| 6 | $1,31 \cdot 10^{-3}$ | $1,17 \cdot 10^{-3}$ | $8,22 \cdot 10^{-4}$ | $4,27 \cdot 10^{-4}$ | $1,44 \cdot 10^{-4}$ | $2,85 \cdot 10^{-5}$ | $1,00 \cdot 10^{-5}$ | | | |
| 7 | $4,16 \cdot 10^{-3}$ | $3,88 \cdot 10^{-3}$ | $3,14 \cdot 10^{-3}$ | $2,11 \cdot 10^{-3}$ | $1,09 \cdot 10^{-3}$ | $4,46 \cdot 10^{-4}$ | $2,37 \cdot 10^{-4}$ | $3,23 \cdot 10^{-5}$ | | |
| 8 | $6,76 \cdot 10^{-3}$ | $6,45 \cdot 10^{-3}$ | $5,55 \cdot 10^{-3}$ | $4,21 \cdot 10^{-3}$ | $2,66 \cdot 10^{-3}$ | $1,20 \cdot 10^{-3}$ | $7,68 \cdot 10^{-4}$ | $1,91 \cdot 10^{-4}$ | $1,06 \cdot 10^{-5}$ | |
| 9 | $5,49 \cdot 10^{-2}$ | $5,32 \cdot 10^{-2}$ | $4,81 \cdot 10^{-2}$ | $3,98 \cdot 10^{-2}$ | $2,91 \cdot 10^{-2}$ | $1,75 \cdot 10^{-2}$ | $1,30 \cdot 10^{-2}$ | $5,06 \cdot 10^{-3}$ | $7,13 \cdot 10^{-4}$ | |
| 10* | 0,264 | 0,258 | 0,239 | 0,207 | 0,163 | 0,102 | 0,081 | 0,039 | 0,009 | 0,000 |
| 15* | 0,688 | 0,683 | 0,667 | 0,637 | 0,591 | 0,477 | 0,444 | 0,354 | 0,220 | 0,051 |

* i valori a 10 e 15 keV sono i accordo con i dati pubblicati sulla ISO 4037-3 entro un fattore $\pm 5\%$.

Tabella 8.7: Coefficienti di conversione monoenergetici $h^*(10; E)$ in Sv/Gy.

| nota | energia fotoni (keV) | $h_k^*(10;E)$ in Sv/Gy |
|--|-------------------------|------------------------|
| calcolati con legge di attenuazione esponenziale | 3 | $< 1 \cdot 10^{-6}$ |
| | 4 | |
| | 5 | |
| | 6 | |
| | 7 | $1,2 \cdot 10^{-5}$ |
| | 8 | $7,8 \cdot 10^{-4}$ |
| | 9 | $5,8 \cdot 10^{-3}$ |
| ISO 4037-3 | 10 | 0,01 |
| | 15 | 0,26 |
| | 20 | 0,61 |
| | 30 | 1,10 |
| | 40 | 1,47 |
| | 50 | 1,67 |
| | 60 | 1,74 |
| | 80 | 1,72 |

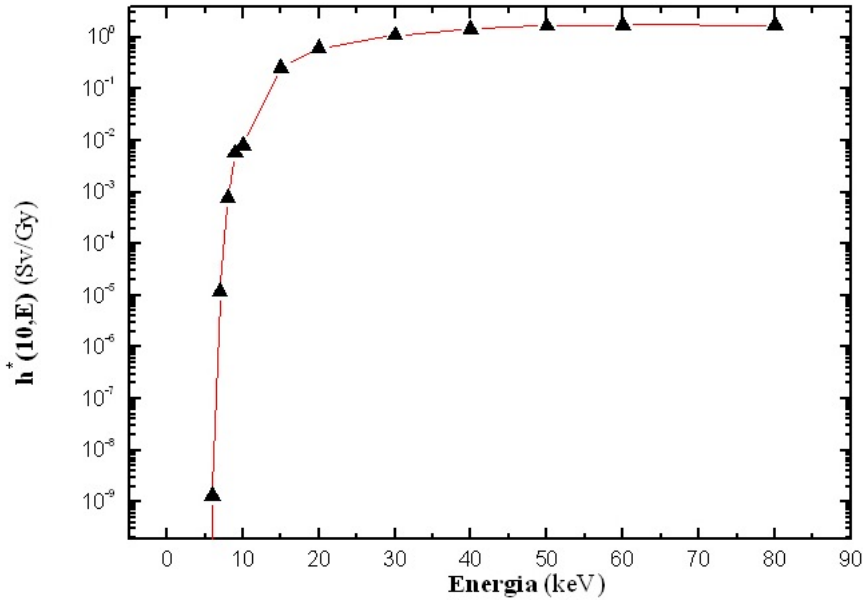


Figura 8.6: Coefficienti di conversione monoenergetici $h^*(10; E)$ in Sv/Gy in funzione dell'energia dei fotoni E .

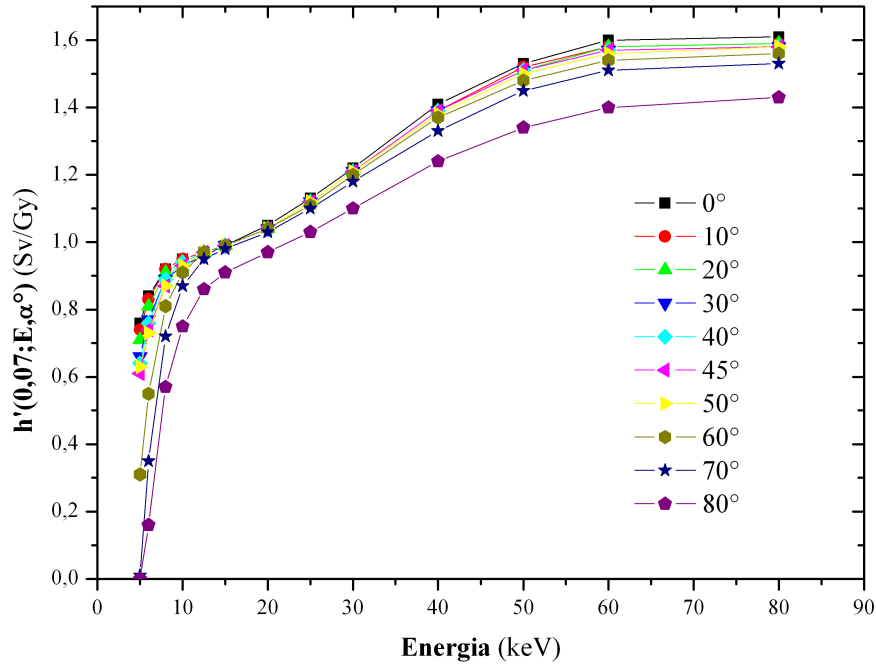


Figura 8.7: Coefficienti di conversione monoenergetici $h'(0,07; E, \alpha^\circ)$ in funzione dell'energia del fotone E e dell'angolo di incidenza della radiazione.

causa di una possibile fluttuazione della densità o dello spessore dell'aria tra la sorgente ed il punto di misura.

8.4.5 Coefficienti di conversione $h'(0,07; R, \alpha^\circ)$

La quantità $H'(0,07; \vec{\Omega})$ è definita come l'equivalente di dose direzionale in un punto di un campo di radiazione che sarebbe prodotta dal corrispondente campo espanso nella sfera ICRU alla profondità di 0,07 mm, lungo un raggio della sfera situato in una specifica direzione. L'equivalente di dose direzionale è previsto per radiazioni debolmente penetranti per le quali non sarebbe corretto non considerare l'attenuazione che comporta una sovrastima dell'equivalente di dose agli organi superficiali. La grandezza $H'(0,07; \vec{\Omega})$, definita nella sfera ICRU per un campo di radiazioni soltanto espanso, a differenza di $H^*(10)$, viene a dipendere dalla distribuzione angolare della radiazione incidente. In particolare il valore di $H'(0,07; \vec{\Omega})$ decresce all'aumentare dell'angolo della radiazione rispetto alla direzione di riferimento.

Al fine di ottenere i coefficienti di conversione $h'(0,07; R, \alpha^\circ)$ per i fasci di radiazioni considerati, i coefficienti di conversione monocromatici riportati nella ISO 4037-3 [5] sono stati interpolati con una funzione lagrangiana su quattro punti. I valori utilizzati sono riportati in figura 8.7.

I coefficienti di conversione $h'(0,07; R, \alpha^\circ)$ per ogni qualità di radiazione, R , considerata nel dominio energetico di interesse sono stati determinati applicando la seguente equazione:

$$h'(0, 07; R, \alpha^\circ) = \frac{\int_0^{E_{max}} C_E(E) \cdot k(E) \cdot h'(0, 07; R, \alpha^\circ) dE}{\int_0^{E_{max}} C_E(E) \cdot k(E) dE} \quad (8.13)$$

I coefficienti di conversione $h'(0, 07; E, \alpha)$ non presentano una forte dipendenza dall'energia; di conseguenza, differenze nella distribuzione spettrale dovute ad impianti con caratteristiche diverse o a variazioni dei parametri ambientali, influenzano i valori di $h'(0, 07; R, \alpha)$ in modo pressochè trascurabile. Quindi al fine di valutare $H'(0, 07; \vec{\Omega})$ è possibile applicare come coefficiente di conversione $h'(0, 07; E, \alpha)$ anche valori ottenuti in diverse condizioni di impiego.

8.5 Parametri caratteristici e loro incertezze

I dati caratteristici (I° e II° spessore emivalente, energia media, fattore di kerma e coefficienti di conversione) di ogni fascio X filtrato preso in esame sono influenzati da diversi fattori tra cui:

- la tensione dell'impianto usato;
- la densità dell'aria;
- la statistica di conteggio degli spettri acquisiti;
- il metodo di ricostruzione dello spettro usato.

L'influenza della variabilità di ognuno di questi parametri sulla determinazione dei dati caratteristici è stata analizzata singolarmente, cioè, facendo variare uno solo dei fattori, è stato osservato come tale fluttuazione andava ad influenzare il valore del dato caratteristico esaminato [5].

Ogni spettro è stato acquisito per un tempo tale da avere una statistica molto buona e ridurre quindi al minimo le incertezze di conteggio. Gli spettri sono stati misurati impostando una corrente del tubo a raggi X molto bassa (circa 0,1 mA) per ridurre un possibile effetto somma del segnale (*pile-up*).

Il metodo di ricostruzione usato è stato validato per ogni spettro applicando la funzione risposta del rivelatore ottenuta con metodo Monte Carlo.

Una analisi dettagliata della variabilità dei dati caratteristici è stata invece fatta per una variazione della densità dell'aria e della tensione dell'impianto, avendo considerato trascurabile tutto ciò che è legato all'acquisizione degli spettri ed alla loro ricostruzione. Gli spettri sono stati suddivisi in tre gruppi in base alla loro energia media: il primo gruppo comprende gli spettri con energia media compresa fra 6,0 e 14,0 keV, il secondo gruppo fra 14,0 e 25,5 keV ed il terzo da 25,5 a 58,0 keV. I dati caratteristici ottenuti sono riportati in Tabella 8.8 e 8.9 per ogni gruppo.

I coefficienti di conversione $h_p(10; R)$ e $h^*(10; R)$ presentano una variazione molto elevata per energie basse. Questo è dovuto alla elevata dipendenza dall'energia dei coefficienti di conversione monoenergetici $h_p(10; E)$ e $h^*(10; E)$, in modo particolare per le basse energie. Come dimostrano i dati riportati in

Tabella 8.8: *Variazione percentuale dei dati caratteristici primo e secondo spessore emivalente (I° e II° SEV), energia media (E_{media}), fattore di kerma ($k(R)$) e coefficienti di conversione $h(0,07;R)$, $h^*(10;R)$, $h(10;R,0)$ e $h(0,07;R,0)$ per una variazione della tensione del tubo a raggi X del $\pm 1\%$.*

| E_{media} in keV del fascio X filtrato, R | ΔI° SEV in % | ΔII° SEV in % | ΔE_{media} in % | $\Delta k(R)$ in % | $\Delta h_p(0,07;R)$ in % | $\Delta h^*(10;R)^\wedge$ in % |
|---|------------------------------|-------------------------------|----------------------------|-----------------------|------------------------------|-----------------------------------|
| 6,0 - 14,0 | 2 - 3 | 2 - 3 | 1 | 2 - 4 | 0,1 - 0,2 | 4 - 40 |
| 14,0 - 25,5 | | | | 1 - 2 | | 1 - 4 |
| 25,5 - 58,0 | | | | | 0,02 - 0,1 | 0,2 - 1 |

[^]Nessuna incertezza è stata determinata per valori inferiori a $1 \cdot 10^{-4}$ Sv/Gy

| E_{media} in keV del fascio X filtrato, R | $\Delta h_p(10;R,0^\circ)$ in % | $\Delta h^*(0,07;R,0^\circ)$ in % |
|---|------------------------------------|--------------------------------------|
| 6,0 - 14,0 | 4 - 40 [^] | 0,2 - 1 [^] |
| 14,0 - 25,5 | 2 - 4 | |
| 25,5 - 58,0 | 1 - 2 | |

[^]Nessuna incertezza è stata determinata per valori inferiori a $1 \cdot 10^{-4}$ Sv/Gy

tabella, la variazione dei dati caratteristici va diminuendo all'aumentare dell'energia media degli spettri. I valori ottenuti dimostrano quanto sia importante che l'impianto utilizzato per la determinazione dei coefficienti di conversione sia il medesimo ed il più possibile stabile durante tutte le misure.

Il parametro ambientale, densità dell'aria, influenza la distribuzione spettrale in modo particolare per quegli spettri che presentano un numero elevato di fotoni di bassa energia. Per avere una stima dell'influenza della densità dell'aria sui dati caratteristici sono state determinate le fluttuazioni andando a correggere gli spettri per valori di densità dell'aria con una variabilità del $\pm 10\%$ rispetto ai valori di riferimento.

Come dimostrato dai dati riportati in Tabella 8.9 all'aumentare dell'energia una possibile variazione della densità dell'aria sulla determinazione dei dati caratteristici diviene trascurabile. Le variazioni maggiori sui dati si hanno per quei parametri che presentano una forte dipendenza dall'energia. Quindi diventa molto importante per fasci X di bassa energia mantenere le stesse condizioni ambientali durante le misure. Per ogni spettro acquisito è stata sempre monitorata sia la temperatura sia la densità dell'aria e non ci sono state variazioni superiori all'1%. Di conseguenza si può affermare rispetto a quanto riportato in tabella che l'influenza di tale variazione sui parametri caratteristici è da considerarsi pressoché trascurabile.

L'analisi delle incertezze sui parametri caratteristici riportata si è basata sui dati riportati in letteratura e ricavati presso altri Laboratori di riferimento [12, 10].

Tabella 8.9: *Variazione percentuale dei dati caratteristici primo e secondo spessore emivalente (I° e II° SEV), energia media (E_{media}), fattore di kerma ($k(R)$) e coefficienti di conversione $h(0,07;R)$, $h^*(10;R)$, $h(10;R)$, $h(0,07;R,0)$ e $h(10;R,0)$ per una variazione della densità dell'aria del $\pm 10\%$.*

| E_{media} in keV del fascio X filtrato, R | ΔI° SEV in % | ΔII° SEV in % | ΔE_{media} in % | $\Delta k(R)$ in % | $\Delta h_p(0,07;R)$ in % | $\Delta h^*(10;R)^\wedge$ in % |
|---|------------------------------|-------------------------------|----------------------------|-----------------------|------------------------------|-----------------------------------|
| 6,0 - 14,0 | 2,5 - 5 | 1,5 - 5,5 | 0,3 - 1,5 | 3 - 7 | 0,2 - 1,5 | 2,5 - 11 [^] |
| 14,0 - 25,5 | 0,3 - 3 | 0,3 - 2 | | 0,4 - 2,5 | | 0,6 - 2,5 |
| 25,5 - 58,0 | 0,2 - 1 | 0,2 - 0,5 | 0,1 - 0,3 | 0,1 - 0,4 | 0,02 - 0,1 | 0,1 - 0,6 |

[^]Nessuna incertezza è stata determinata per valori inferiori a $1 \cdot 10^{-4}$ Sv/Gy

| E_{media} in keV del fascio X filtrato, R | $\Delta h_p(10;R,0^\circ)$ in % | $\Delta h^*(0,07;R,0^\circ)$ in % |
|---|------------------------------------|--------------------------------------|
| 6,0 - 14,0 | 2,5 - 12 [^] | 0,3 - 0,7 [^] |
| 14,0 - 25,5 | 0,5 - 3 | |
| 25,5 - 58,0 | 0,1 - 0,8 | |

[^]Nessuna incertezza è stata determinata per valori inferiori a $1 \cdot 10^{-4}$ Sv/Gy

Capitolo 9

Risultati

9.1 Tabelle riassuntive dei dati caratteristici degli spettri

Per ogni radiazione di riferimento (R) raccomandata dall'ISO [1] a livello internazionale, nel dominio energetico di interesse, è stata effettuata, direttamente sui fasci di radiazione, una analisi completa della qualità del fascio con uno spettrometro con rivelatore al Germanio [7]. Per ogni qualità di radiazione della serie "Low Air-Kerma Rate series" (L), "Narrow-Spectrum series" (N), "High Air-Kerma rate series" (H) e per due fasci di energia inferiori a quelle riportate dalla normativa, pari rispettivamente a 5 kV e 7,5 kV, sono stati analizzati i seguenti parametri:

- primo e secondo spessore emivalente (I° SEV, II° SEV)
- energia media dello spettro ($\overline{E}_{\text{media}}$)
- fattore di kema $k(R)$
- coefficiente di conversione $h(0,07; R, \alpha)$ da kerma in aria, k_a , alla grandezza operativa equivalente di dose personale, $H_p(0,07)$, per la pelle a diversi angoli di incidenza
- coefficiente di conversione $h(3; R, \alpha^\circ)$ da kerma in aria, k_a , alla grandezza operativa equivalente di dose personale, $H_p(3)$, per il cristallino a diversi angoli di incidenza
- coefficiente di conversione $h(10; R, \alpha^\circ)$ da kerma in aria, k_a , alla grandezza operativa equivalente di dose personale, $H_p(10)$, per un fantoccio a slab a diversi angoli di incidenza
- coefficiente di conversione $h^*(10; R)$ da kerma in aria, k_a , alla grandezza operativa equivalente di dose ambientale, $H^*(10)$
- coefficiente di conversione $h'(0,07; R, \vec{\Omega})$ da kerma in aria, k_a alla grandezza operativa equivalente di dose direzionale, $H'(0,07; \vec{\Omega})$, per diversi angoli di incidenza

Vengono inoltre riportati i parametri caratteristici di spettri non filtrati (senza alcuna filtrazione addizionale) ottenuti impostando una tensione al tubo pari a 5 kV e 7,5 kV.

Ogni spettro è stato misurato a due diverse distanze dalla sorgente di radiazioni; rispettivamente a 50 cm e 200 cm, in modo da ottenere un fascio omogeneo e delle dimensioni sufficienti rispettivamente alla taratura di strumentazione di radioprotezione e irraggiamento di dosimetri personali su fantoccio.

Per potere disporre di tutte le qualità di radiazione X nel campo nel campo delle basse energie previsto per il riconoscimento, è richiesto che i fasci appartenenti alle serie L e N con energia media inferiore a 30 keV abbiano una energia media entro il $\pm 5\%$ ed una risoluzione entro il $\pm 15\%$ dei valori riportati nella ISO 4037-1 Tab. 3 e 4 [1].

9.2 Distanza sorgente-rivelatore = 50 cm

9.2.1 La serie ISO "Low Air-Kerma Rate series"

Tabella 9.1: Caratteristiche delle radiazioni di riferimento della serie "Low Air-Kerma Rate series" (L) misurate sperimentalmente con un rivelatore al Germanio (metodo spettrometrico) specificate nella ISO 4037-1 [1]: energia media, E_{media} ed energia massima, E_{max} dello spettro in keV, coefficiente di omogeneità ($h = ISEV/IISEV$), risoluzione in %, fattore di kerma $k(R)$ in $pGy \cdot cm^2$. Coefficiente di conversione da kerma in aria, K_a , all'equivalente di dose ambientale, $H^*(10)$, per la sfera ICRU. Distanza sorgente-rivelatore (SDD) = 50. cm

| | E_{media} (keV) | E_{max} (keV) | I° SEV (mm) | II° SEV (mm) | Coefficiente di omogeneità | Risoluzione (%) | $k(R)$ ($pGy \cdot cm^2$) | $h^*(10;L)$ (Sv/Gy) |
|-----|----------------------|--------------------|----------------|-----------------|----------------------------------|--------------------|--------------------------------|------------------------|
| L10 | 8,2 | 9,4 | 0,057 | 0,058 | 0,98 | 19 | 12,29 | 0,011 |
| L20 | 16,1 | 18,4 | 0,40 | 0,41 | 0,98 | 19 | 3,51 | 0,39 |
| L30 | 26,1 | 29,5 | 1,51 | 1,55 | 0,97 | 18 | 1,89 | 0,97 |
| L35 | 30,5 | 35,4 | 2,28 | 2,30 | 0,99 | 21 | 1,71 | 1,44 |

Tabella 9.2: Coefficienti di conversione $h(10; L, \alpha^\circ)$ in Sv/Gy da kerma in aria, K_a , all'equivalente di dose personale, $H_p(10)$, per il fantoccio a slab e per le qualità della radiazione della serie "Low Air-Kerma Rate series" come specificato nella ISO 4037-1 [1]; distanza sorgente-rivelatore = 50 cm.

| h(10;L,α°) in Sv/Gy per angolo di incidenza α°: | | | | | | | | | | |
|---|-------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 0° | 10° | 20° | 30° | 40° | 45° | 50° | 60° | 70° | 80° |
| L10 | 0,001 | 0,001 | 0,001 | - | - | - | - | - | - | - |
| L20 | 0,34 | 0,33 | 0,31 | 0,28 | 0,23 | 0,16 | 0,13 | 0,08 | 0,03 | - |
| L30 | 0,92 | 0,92 | 0,91 | 0,88 | 0,81 | 0,79 | 0,74 | 0,62 | 0,42 | 0,18 |
| L35 | 1,46 | 1,45 | 1,43 | 1,40 | 1,34 | 1,29 | 1,24 | 1,11 | 0,89 | 0,49 |

Tabella 9.3: Coefficienti di conversione $h(0,07;L,\alpha^\circ)$ in Sv/Gy da kerma in aria, K_a , all'equivalente di dose personale, $H_p(0,07)$, per la pelle e per le qualità della radiazione della serie "Low Air-Kerma Rate series" come specificato nella ISO 4037-1 [1]; distanza sorgente-rivelatore = 50 cm.

| h(0,07;L,α°) in Sv/Gy per angolo di incidenza α° : | | | | | | | | | | |
|--|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 0° | 10° | 20° | 30° | 40° | 45° | 50° | 60° | 70° | 80° |
| L10 | 0,92 | 0,92 | 0,92 | 0,92 | 0,91 | 0,91 | 0,91 | 0,90 | 0,90 | 0,88 |
| L20 | 1,00 | 0,99 | 0,99 | 1,00 | 0,99 | 0,99 | 0,98 | 0,98 | 0,95 | 0,87 |
| L30 | 1,04 | 1,04 | 1,04 | 1,04 | 1,03 | 1,04 | 1,03 | 1,02 | 1,02 | 1,02 |
| L35 | 1,06 | 1,06 | 1,06 | 1,06 | 1,05 | 1,05 | 1,05 | 1,05 | 1,04 | 1,04 |

Tabella 9.4: Coefficiente di conversione $h(3;L,\alpha)$ in Sv/Gy da kerma in aria, K_a , all'equivalente di dose personale, $H_p(3)$, per il cristallino e per le qualità della radiazione della serie "Low Air-Kerma Rate series" [15].

$h(3;L,\alpha^\circ)$ in Sv/Gy per angolo di incidenza α° :

| | 0° | 15° | 30° | 45° | 60° | 75° |
|------------|------|------|------|------|------|------|
| L10 | 0,02 | 0,02 | 0,01 | 0,01 | - | - |
| L20 | 0,81 | 0,79 | 0,74 | 0,64 | 0,48 | 0,43 |
| L30 | 1,10 | 1,09 | 1,08 | 1,03 | 0,95 | 0,73 |
| L35 | 1,48 | 1,48 | 1,46 | 1,40 | 1,29 | 1,06 |

Tabella 9.5: Coefficienti di conversione $h'(0,07;L,\alpha^\circ)$ in Sv/Gy da kerma in aria, K_a , all'equivalente di dose direzionale, $H'(0,07,\Omega)$, per la sfera ICRU e per le qualità della radiazione della serie "Low Air-Kerma Rate series" come specificato nella ISO 4037-1 [1]; distanza sorgente-rivelatore = 50 cm.

| h'(0,07;L,α°) in Sv/Gy per angolo di incidenza α° : | | | | | | | | | | |
|---|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 0° | 10° | 20° | 30° | 40° | 45° | 50° | 60° | 70° | 80° |
| L10 | 0,92 | 0,92 | 0,91 | 0,89 | 0,89 | 0,87 | 0,87 | 0,81 | 0,72 | 0,58 |
| L20 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 0,99 | 0,92 |
| L30 | 1,15 | 1,14 | 1,14 | 1,14 | 1,14 | 1,14 | 1,14 | 1,13 | 1,11 | 1,04 |
| L35 | 1,39 | 1,38 | 1,37 | 1,37 | 1,37 | 1,37 | 1,37 | 1,35 | 1,32 | 1,23 |

9.2.2 La serie ISO "Narrow-Spectrum series"

Tabella 9.6: Caratteristiche delle radiazioni di riferimento della serie "Narrow-Spectrum series" (N) misurate sperimentalmente con un rivelatore al Germanio (metodo spettrometrico) specificate nella ISO 4037-1 [1]: energia media, E_{media} ed energia massima, E_{max} dello spettro in keV, coefficiente di omogeneità ($h = ISEV/IISEV$), risoluzione in %, fattore di kerma $k(R)$ in $pGy \cdot cm^2$. Coefficiente di conversione da kerma in aria, K_a , all'equivalente di dose ambientale, $H^*(10)$, per la sfera ICRU. Distanza sorgente-rivelatore (SDD) = 50. cm

| | E_{media} (keV) | E_{max} (keV) | I° SEV (mm) | II° SEV (mm) | Coefficiente di omogeneità | Risoluzione (%) | $k(R)$ ($pGy \cdot cm^2$) | $h^* (10;N)$ (Sv/Gy) |
|-----|----------------------|--------------------|----------------|-----------------|----------------------------------|--------------------|--------------------------------|-----------------------------|
| N10 | 8,2 | 9,3 | 0,048 | 0,053 | 0,91 | 27 | 12,38 | 0,006 |
| N15 | 11,7 | 14,5 | 0,14 | 0,16 | 0,88 | 28 | 6,46 | 0,113 |
| N20 | 15,3 | 18,9 | 0,32 | 0,35 | 0,91 | 32 | 3,98 | 0,322 |
| N25 | 19,4 | 24,6 | 0,66 | 0,74 | 0,89 | 30 | 1,78 | 0,574 |
| N30 | 24,0 | 29,2 | 1,15 | 1,27 | 0,91 | 30 | 2,07 | 0,856 |
| N40 | 33,5 | 40,0 | 2,80 | 2,97 | 0,94 | 28 | 1,66 | 1,264 |

Tabella 9.7: Coefficienti di conversione $h(10; N, \alpha^\circ)$ in Sv/Gy da kerma in aria, K_a , all'equivalente di dose personale, $H_p(10)$, per il fantoccio a slab e per le qualità della radiazione della serie "Narrow-Spectrum series" (N) come specificato nella ISO 4037-1 [1]; distanza sorgente-rivelatore = 50 cm.

| h(10;N,α°) in Sv/Gy per angolo di incidenza α° : | | | | | | | | | | |
|--|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| | 0° | 10° | 20° | 30° | 40° | 45° | 50° | 60° | 70° | 80° |
| N10 | <1·10 ⁻³ | <1·10 ⁻³ | <1·10 ⁻³ | <1·10 ⁻³ | <1·10 ⁻³ | <1·10 ⁻³ | <1·10 ⁻³ | <1·10 ⁻³ | <1·10 ⁻³ | <1·10 ⁻³ |
| N15 | 0,07 | 0,07 | 0,06 | 0,05 | 0,03 | 0,01 | 0,01 | <1·10 ⁻³ | <1·10 ⁻³ | <1·10 ⁻³ |
| N20 | 0,27 | 0,26 | 0,24 | 0,21 | 0,17 | 0,11 | 0,09 | 0,06 | 0,02 | <1·10 ⁻³ |
| N25 | 0,57 | 0,55 | 0,53 | 0,52 | 0,48 | 0,44 | 0,35 | 0,30 | 0,10 | 0,09 |
| N30 | 0,80 | 0,80 | 0,79 | 0,76 | 0,70 | 0,67 | 0,62 | 0,50 | 0,33 | 0,13 |
| N40 | 1,24 | 1,22 | 1,21 | 1,18 | 1,12 | 1,08 | 1,04 | 0,91 | 0,72 | 0,35 |

Tabella 9.8: Coefficienti di conversione $h(0,07;N,\alpha^\circ)$ in Sv/Gy da kerma in aria, K_a , all'equivalente di dose personale, $H_p(0,07)$, per la pelle e per le qualità della radiazione della serie "Narrow-Spectrum series" (N) come specificato nella ISO 4037-1 [1]; distanza sorgente-rivelatore = 50 cm.

| h(0,07;N,α°) in Sv/Gy per angolo di incidenza α° : | | | | | | | | | | |
|--|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 0° | 10° | 20° | 30° | 40° | 45° | 50° | 60° | 70° | 80° |
| N10 | 0,92 | 0,92 | 0,92 | 0,92 | 0,91 | 0,91 | 0,91 | 0,90 | 0,90 | 0,88 |
| N15 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,01 | 0,99 | 0,98 | 0,97 | 0,94 | 0,86 | 0,63 |
| N20 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,01 | 0,99 | 0,99 | 0,98 | 0,97 | 0,92 | 0,77 |
| N25 | 1,03 | 1,03 | 1,03 | 1,03 | 1,03 | 1,02 | 1,02 | 1,02 | 1,01 | 1,01 |
| N30 | 1,11 | 1,11 | 1,11 | 1,11 | 1,09 | 1,09 | 1,09 | 1,08 | 1,05 | 1,00 |
| N40 | 1,30 | 1,29 | 1,29 | 1,29 | 1,27 | 1,26 | 1,25 | 1,22 | 1,18 | 1,11 |

Tabella 9.9: Coefficiente di conversione $h(3; N, \alpha)$ in Sv/Gy da kerma in aria, K_a , all'equivalente di dose personale, $H_p(3)$, per il cristallino e per le qualità della radiazione della serie "Narrow-Spectrum series" [15].

$h(3; N, \alpha^\circ)$ in Sv/Gy per angolo di incidenza α° :

| | 0° | 15° | 30° | 45° | 60° | 75° |
|------------|------|------|------|------|------|------|
| N10 | 0,02 | 0,02 | 0,01 | 0,01 | - | - |
| N15 | 0,62 | 0,59 | 0,49 | 0,34 | 0,16 | 0,16 |
| N20 | 0,81 | 0,79 | 0,71 | 0,59 | 0,40 | 0,37 |
| N25 | 0,95 | 0,84 | 0,80 | 0,60 | 0,50 | 0,46 |
| N30 | 1,02 | 1,02 | 1,01 | 0,95 | 0,87 | 0,65 |
| N40 | 1,32 | 1,31 | 1,30 | 1,25 | 1,15 | 0,93 |

Tabella 9.10: Coefficienti di conversione $h'(0,07;N,\alpha^\circ)$ in Sv/Gy da kerma in aria, K_a , all'equivalente di dose direzionale, $H'(0,07,\Omega)$, per la sfera ICRU e per le qualità della radiazione della serie "Narrow-Spectrum series" (N) come specificato nella ISO 4037-1 [1]; distanza sorgente-rivelatore = 50 cm.

| $h'(0,07;N,\alpha^\circ)$ in Sv/Gy per angolo di incidenza α° : | | | | | | | | | | |
|--|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 0° | 10° | 20° | 30° | 40° | 45° | 50° | 60° | 70° | 80° |
| N10 | 0,92 | 0,92 | 0,91 | 0,89 | 0,89 | 0,87 | 0,87 | 0,81 | 0,72 | 0,58 |
| N15 | 1,00 | 0,96 | 0,96 | 0,94 | 0,95 | 0,95 | 0,95 | 0,94 | 0,91 | 0,80 |
| N20 | 1,00 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,97 | 0,90 |
| N25 | 1,03 | 1,03 | 1,03 | 1,03 | 1,03 | 1,03 | 1,03 | 1,03 | 1,03 | 1,01 |
| N30 | 1,11 | 1,10 | 1,10 | 1,10 | 1,10 | 1,10 | 1,10 | 1,09 | 1,08 | 1,01 |
| N40 | 1,30 | 1,27 | 1,27 | 1,27 | 1,27 | 1,27 | 1,27 | 1,26 | 1,23 | 1,15 |

9.2.3 La serie ISO "High Air-Kerma Rate series"

Tabella 9.11: Caratteristiche delle radiazioni di riferimento della serie "High Air-Kerma Rate series" (H) misurate sperimentalmente con un rivelatore al Germanio (metodo spettrometrico) specificate nella ISO 4037-1 [1]: energia media E_{media} ed energia massima E_{max} dello spettro in keV, coefficiente di omogeneità ($h = ISEV/IISEV$), risoluzione in %, fattore di kerma $k(R)$ in $pGy \cdot cm^2$. Coefficiente di conversione da kerma in aria, K_a , all'equivalente di dose ambientale, $H^*(10)$, per la sfera ICRU. Distanza sorgente-rivelatore (SDD) = 50. cm

| | E_{media} (keV) | E_{max} (keV) | I° SEV (mm) | II° SEV (mm) | Coefficiente di omogeneità | Risoluzione (%) | $k(R)$ ($pGy \cdot cm^2$) | $h^*(10;H)$ (Sv/Gy) |
|-----|----------------------|--------------------|----------------|-----------------|----------------------------------|--------------------|--------------------------------|----------------------------|
| H10 | 7,7 | 10,4 | 0,04 | 0,04 | 0,974 | 52 | 15,40 | 0,005 |
| H20 | 11,9 | 20,2 | 0,12 | 0,15 | 0,800 | 89 | 8,61 | 0,11 |
| H30 | 19,9 | 30,1 | 0,36 | 0,58 | 0,621 | 70 | 3,05 | 0,50 |
| H60 | 38,2 | 59,9 | 2,4 | 3,48 | 0,689 | 76 | 1,70 | 1,32 |

Tabella 9.12: Coefficienti di conversione $h(10; H, \alpha^\circ)$ in Sv/Gy da kerma in aria, K_a , all'equivalente di dose personale, $H_p(10)$, per il fantoccio a slab e per le qualità della radiazione della serie "High Air-Kerma Rate series" (H) come specificato nella ISO 4037-1 [1]; distanza sorgente-rivelatore = 50 cm.

| h (10;H, α°) in Sv/Gy per angolo di incidenza α° : | | | | | | | | | | |
|---|-------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| | 0° | 10° | 20° | 30° | 40° | 45° | 50° | 60° | 70° | 80° |
| H10 | 0,001 | <1·10 ⁻⁴ | <1·10 ⁻⁴ | <1·10 ⁻⁴ | <1·10 ⁻⁴ | <1·10 ⁻⁴ | <1·10 ⁻⁴ | <1·10 ⁻⁴ | <1·10 ⁻⁴ | <1·10 ⁻⁴ |
| H20 | 0,08 | 0,07 | 0,07 | 0,06 | 0,05 | 0,03 | 0,02 | 0,01 | 0,01 | <1·10 ⁻⁴ |
| H30 | 0,45 | 0,45 | 0,43 | 0,41 | 0,36 | 0,32 | 0,29 | 0,23 | 0,14 | 0,05 |
| H60 | 1,33 | 1,32 | 1,30 | 1,27 | 1,21 | 1,17 | 1,12 | 0,99 | 0,78 | 0,42 |

Tabella 9.13: Coefficienti di conversione $h(0,07; H, \alpha^\circ)$ in Sv/Gy da kerma in aria, K_a , all'equivalente di dose personale, $H_p(0,07)$, per la pelle e per le qualità della radiazione della serie "High Air-Kerma Rate series" (H) come specificato nella ISO 4037-1 [1]; distanza sorgente-rivelatore = 50 cm.

| $h(0,07; H, \alpha^\circ)$ in Sv/Gy per angolo di incidenza α°: | | | | | | | | | | |
|--|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 0° | 10° | 20° | 30° | 40° | 45° | 50° | 60° | 70° | 80° |
| H10 | 0,88 | 0,88 | 0,87 | 0,87 | 0,85 | 0,85 | 0,84 | 0,82 | 0,78 | 0,67 |
| H20 | 0,97 | 0,97 | 0,97 | 0,97 | 0,96 | 0,95 | 0,95 | 0,93 | 0,90 | 0,78 |
| H30 | 1,04 | 1,04 | 1,04 | 1,04 | 1,03 | 1,02 | 1,02 | 1,01 | 0,97 | 0,87 |
| H60 | 1,37 | 1,37 | 1,36 | 1,36 | 1,34 | 1,33 | 1,32 | 1,28 | 1,22 | 1,13 |

Tabella 9.14: Coefficiente di conversione $h(3; H, \alpha)$ in Sv/Gy da kerma in aria, K_a , all'equivalente di dose personale, $H_p(3)$, per il cristallino e per le qualità della radiazione della serie High Air-Kerma Rate series" (H) [15].

$h(3; H, \alpha^\circ)$ in Sv/Gy per angolo di incidenza α° :

| | 0° | 15° | 30° | 45° | 60° | 75° |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| H10 | 0,021 | 0,020 | 0,016 | 0,010 | 0,004 | 0,004 |
| H20 | 0,381 | 0,366 | 0,317 | 0,238 | 0,136 | 0,127 |
| H30 | 0,829 | 0,817 | 0,769 | 0,679 | 0,547 | 0,437 |
| H60 | 1,381 | 1,376 | 1,357 | 1,302 | 1,198 | 0,973 |

Tabella 9.15: Coefficienti di conversione $h'(0,07;H,\alpha^\circ)$ in Sv/Gy da kerma in aria, K_a , all'equivalente di dose direzionale, $H'(0,07,\Omega)$, per la sfera ICRU e per le qualità della radiazione della serie "High Air-Kerma Rate series" (H) come specificato nella ISO 4037-1 [1]; distanza sorgente-rivelatore = 50 cm.

| h'(0,07;H, α°) in Sv/Gy per angolo di incidenza α° : | | | | | | | | | | |
|---|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 0° | 10° | 20° | 30° | 40° | 45° | 50° | 60° | 70° | 80° |
| H10 | 0,84 | 0,84 | 0,83 | 0,80 | 0,80 | 0,78 | 0,77 | 0,67 | 0,54 | 0,39 |
| H20 | 0,95 | 0,95 | 0,94 | 0,93 | 0,94 | 0,93 | 0,93 | 0,90 | 0,85 | 0,74 |
| H30 | 1,03 | 1,03 | 1,02 | 1,02 | 1,02 | 1,02 | 1,02 | 1,02 | 1,00 | 0,92 |
| H60 | 1,33 | 1,32 | 1,31 | 1,31 | 1,31 | 1,31 | 1,31 | 1,29 | 1,26 | 1,17 |

9.3 Distanza sorgente-rivelatore = 200 cm

9.3.1 La serie ISO "Low Air-Kerma Rate series"

Tabella 9.16: Caratteristiche delle radiazioni di riferimento della serie "Low Air-Kerma Rate series" (L) misurate sperimentalmente con un rivelatore al Germanio (metodo spettrometrico) specificate nella ISO 4037-1 [1]: energia media E_{media} ed energia massima E_{max} dello spettro in keV, coefficiente di omogeneità ($h = ISEV/IISEV$), risoluzione in %, fattore di kerma $k(R)$ in $pGy \cdot cm^2$. Coefficiente di conversione da kerma in aria, K_a , all'equivalente di dose ambientale, $H^*(10)$, per la sfera ICRU. Distanza sorgente-rivelatore (SDD) = 200. cm

| | E_{media} (keV) | E_{max} (keV) | I° SEV (mm) | II° SEV (mm) | Coefficiente di omogeneità | Risoluzione (%) | $k(R)$ ($pGy \cdot cm^2$) | $h^* (10;L)$ (Sv/Gy) |
|-----|----------------------|--------------------|----------------|-----------------|----------------------------------|--------------------|--------------------------------|-------------------------|
| L10 | 8,5 | 9,4 | 0,06 | 0,06 | 1,00 | 18 | 11,6 | 0,010 |
| L20 | 16,2 | 19,5 | 0,44 | 0,48 | 0,92 | 19 | 3,52 | 0,37 |
| L30 | 26,1 | 29,5 | 1,57 | 1,63 | 0,96 | 18 | 1,89 | 0,97 |
| L35 | 30,3 | 35,4 | 2,25 | 2,27 | 0,99 | 22 | 1,72 | 1,44 |

Tabella 9.17: Coefficienti di conversione $h(10; L, \alpha^\circ)$ in Sv/Gy da kerma in aria, K_a , all'equivalente di dose personale, $H_p(10)$, per il fantoccio a slab e per le qualità della radiazione della serie "Low Air-Kerma Rate series" (L) come specificato nella ISO 4037-1 [1]. Distanza sorgente-rivelatore = 200 cm.

| h(10;L,α°) in Sv/Gy per angolo di incidenza α° : | | | | | | | | | | |
|--|-------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 0° | 10° | 20° | 30° | 40° | 45° | 50° | 60° | 70° | 80° |
| L10 | 0,001 | 0,001 | 0,001 | - | - | - | - | - | - | - |
| L20 | 0,41 | 0,40 | 0,39 | 0,36 | 0,30 | 0,27 | 0,23 | 0,16 | 0,04 | - |
| L30 | 0,93 | 0,92 | 0,91 | 0,88 | 0,82 | 0,79 | 0,74 | 0,62 | 0,42 | 0,17 |
| L35 | 1,46 | 1,44 | 1,43 | 1,40 | 1,34 | 1,29 | 1,24 | 1,11 | 0,89 | 0,37 |

Tabella 9.18: Coefficienti di conversione $h(0,07;L,\alpha^\circ)$ in Sv/Gy da kerma in aria, K_a , all'equivalente di dose personale, $H_p(0,07)$, per la pelle e per le qualità della radiazione della serie "Low Air-Kerma Rate series" (L) come specificato nella ISO 4037-1 [1]; distanza sorgente-rivelatore = 200 cm.

| h(0,07;L, α°) in Sv/Gy per angolo di incidenza α° : | | | | | | | | | | |
|--|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 0° | 10° | 20° | 30° | 40° | 45° | 50° | 60° | 70° | 80° |
| L10 | 0,92 | 0,92 | 0,92 | 0,92 | 0,91 | 0,91 | 0,91 | 0,90 | 0,90 | 0,88 |
| L20 | 1,00 | 0,99 | 0,99 | 1,00 | 0,99 | 0,99 | 0,98 | 0,98 | 0,95 | 0,87 |
| L30 | 1,04 | 1,04 | 1,04 | 1,04 | 1,03 | 1,04 | 1,03 | 1,02 | 1,02 | 1,02 |
| L35 | 1,06 | 1,06 | 1,06 | 1,06 | 1,05 | 1,05 | 1,05 | 1,05 | 1,04 | 1,04 |

Tabella 9.19: Coefficiente di conversione $h(3; L, \alpha)$ in Sv/Gy da kerma in aria, K_a , all'equivalente di dose personale, $H_p(3; L, \alpha)$, per il cristallino e per le qualità della radiazione della serie "Low Air-Kerma Rate series" [15].

$h(3; L, \alpha^\circ)$ in Sv/Gy per angolo di incidenza α° :

| | 0° | 15° | 30° | 45° | 60° | 75° |
|------------|------|------|------|------|-------|-------|
| L10 | 0,03 | 0,03 | 0,02 | 0,01 | 0,006 | 0,006 |
| L20 | 0,81 | 0,79 | 0,74 | 0,64 | 0,48 | 0,43 |
| L30 | 1,09 | 1,09 | 1,08 | 1,03 | 0,95 | 0,73 |
| L35 | 1,48 | 1,48 | 1,45 | 1,39 | 1,29 | 1,06 |

Tabella 9.20: Coefficienti di conversione $h'(0,07;L,\alpha^\circ)$ in Sv/Gy da kerma in aria, K_a , all'equivalente di dose direzionale, $H'(0,07,\Omega)$, per la sfera ICRU e per le qualità della radiazione della serie "Low Air-Kerma Rate series" (L) come specificato nella ISO 4037-1 [1]; distanza sorgente-rivelatore = 200 cm.

| h'(0,07;L, α°) in Sv/Gy per angolo di incidenza α° : | | | | | | | | | | |
|---|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 0° | 10° | 20° | 30° | 40° | 45° | 50° | 60° | 70° | 80° |
| L10 | 0,93 | 0,93 | 0,92 | 0,90 | 0,90 | 0,88 | 0,89 | 0,83 | 0,76 | 0,62 |
| L20 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 0,99 | 0,92 |
| L30 | 1,15 | 1,14 | 1,14 | 1,14 | 1,14 | 1,14 | 1,14 | 1,13 | 1,12 | 1,04 |
| L35 | 1,39 | 1,38 | 1,37 | 1,37 | 1,37 | 1,37 | 1,37 | 1,35 | 1,32 | 1,23 |

9.3.2 La serie ISO "Narrow-Spectrum series"

Tabella 9.21: Caratteristiche delle radiazioni di riferimento della serie "Narrow-Spectrum series" (N) misurate sperimentalmente con un rivelatore al Germanio (metodo spettrometrico) specificate nella ISO 4037-1 [1]: energia media E_{media} ed energia massima E_{max} dello spettro in keV, coefficiente di omogeneità ($h = ISEV/IISEV$), risoluzione in %, fattore di kerma $k(R)$ in pGy · cm². Coefficiente di conversione da kerma in aria, K_a , all'equivalente di dose ambientale, $H^*(10)$, per la sfera ICRU. Distanza sorgente-rivelatore (SDD) = 200. cm

| | E_{media} (keV) | E_{max} (keV) | I° SEV (mm) | II° SEV (mm) | Coefficiente di omogeneità | Risoluzione (%) | $k(R)$ (pGy · cm ²) | $h^*(10;N)$ (Sv/Gy) |
|-----|----------------------|--------------------|----------------|-----------------|----------------------------------|--------------------|------------------------------------|------------------------|
| N10 | 8,4 | 9,3 | 0,056 | 0,063 | 0,89 | 27 | 11,93 | 0,009 |
| N15 | 11,9 | 14,5 | 0,16 | 0,17 | 0,94 | 28 | 6,15 | 0,127 |
| N20 | 15,5 | 18,9 | 0,34 | 0,36 | 0,94 | 32 | 3,81 | 0,342 |
| N25 | 19,3 | 24,5 | 0,67 | 0,75 | 0,89 | 30 | 1,78 | 0,574 |
| N30 | 23,8 | 29,2 | 1,22 | 1,24 | 0,98 | 30 | 2,10 | 0,843 |
| N40 | 33,2 | 40,0 | 2,80 | 3,04 | 0,92 | 28 | 1,66 | 1,253 |

Tabella 9.22: Coefficienti di conversione $h(10; N, \alpha^\circ)$ in Sv/Gy da kerma in aria, K_a , all'equivalente di dose personale, $H_p(10)$, per il fantoccio a slab e per le qualità della radiazione della serie "Narrow-Spectrum series" (N) come specificato nella ISO 4037-1 [1]; distanza sorgente-rivelatore = 200 cm.

| h (10;N,α°) in Sv/Gy per angolo di incidenza α° : | | | | | | | | | | |
|---|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| | 0° | 10° | 20° | 30° | 40° | 45° | 50° | 60° | 70° | 80° |
| N10 | <1·10 ⁻³ | <1·10 ⁻³ | <1·10 ⁻³ | <1·10 ⁻³ | <1·10 ⁻³ | <1·10 ⁻³ | <1·10 ⁻³ | <1·10 ⁻³ | <1·10 ⁻³ | <1·10 ⁻³ |
| N15 | 0,08 | 0,08 | 0,07 | 0,05 | 0,04 | 0,01 | 0,01 | <1·10 ⁻³ | <1·10 ⁻³ | <1·10 ⁻³ |
| N20 | 0,29 | 0,28 | 0,26 | 0,23 | 0,19 | 0,12 | 0,10 | 0,06 | 0,03 | <1·10 ⁻³ |
| N25 | 0,55 | 0,55 | 0,53 | 0,50 | 0,44 | 0,41 | 0,37 | 0,28 | 0,15 | 0,09 |
| N30 | 0,79 | 0,79 | 0,77 | 0,74 | 0,68 | 0,65 | 0,60 | 0,49 | 0,31 | 0,12 |
| N40 | 1,22 | 1,21 | 1,20 | 1,17 | 1,11 | 1,07 | 1,03 | 0,90 | 0,71 | 0,35 |

Tabella 9.23: Coefficienti di conversione $h(0,07;N,\alpha^\circ)$ in Sv/Gy da kerma in aria, K_a , all'equivalente di dose personale, $H_p(0,07)$, per la pelle e per le qualità della radiazione della serie "Narrow-Spectrum series" (N) come specificato nella ISO 4037-1 [1]; distanza sorgente-rivelatore = 200 cm.

| h(0,07;N,α°) in Sv/Gy per angolo di incidenza α° : | | | | | | | | | | |
|--|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 0° | 10° | 20° | 30° | 40° | 45° | 50° | 60° | 70° | 80° |
| N10 | 0,92 | 0,92 | 0,92 | 0,92 | 0,91 | 0,91 | 0,91 | 0,90 | 0,90 | 0,87 |
| N15 | 1,01 | 1,01 | 1,00 | 1,02 | 0,99 | 0,98 | 0,97 | 0,95 | 0,86 | 0,61 |
| N20 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,01 | 0,99 | 0,99 | 0,98 | 0,97 | 0,92 | 0,79 |
| N25 | 1,03 | 1,03 | 1,03 | 1,03 | 1,02 | 1,02 | 1,01 | 1,01 | 1,00 | 0,98 |
| N30 | 1,11 | 1,10 | 1,10 | 1,10 | 1,09 | 1,09 | 1,09 | 1,08 | 1,05 | 1,00 |
| N40 | 1,29 | 1,29 | 1,28 | 1,29 | 1,27 | 1,26 | 1,25 | 1,21 | 1,18 | 1,10 |

Tabella 9.24: Coefficiente di conversione $h(3; N, \alpha)$ in Sv/Gy da kerma in aria, K_a , all'equivalente di dose personale, $H_p(3)$, per il cristallino e per le qualità della radiazione della serie "Narrow-Spectrum series" (N) [15].

$h(3; N, \alpha^\circ)$ in Sv/Gy per angolo di incidenza α° :

| | 0° | 15° | 30° | 45° | 60° | 75° |
|------------|------|------|------|------|------|------|
| N10 | 0,04 | 0,04 | 0,03 | 0,02 | 0,01 | 0,01 |
| N15 | 0,68 | 0,65 | 0,55 | 0,38 | 0,17 | 0,17 |
| N20 | 0,82 | 0,80 | 0,73 | 0,61 | 0,43 | 0,39 |
| N25 | 0,95 | 0,84 | 0,80 | 0,60 | 0,50 | 0,46 |
| N30 | 1,02 | 1,01 | 1,00 | 0,94 | 0,86 | 0,65 |
| N40 | 1,31 | 1,30 | 1,29 | 1,24 | 1,14 | 0,93 |

Tabella 9.25: Coefficienti di conversione $h'(0,07; R, \alpha^\circ)$ in Sv/Gy da kerma in aria, K_a , all'equivalente di dose direzionale, $H'(0,07, \Omega)$, per la sfera ICRU e per le qualità della radiazione della serie "Narrow-Spectrum series" (N) come specificato nella ISO 4037-1 [1]; distanza sorgente-rivelatore = 200 cm.

| h'(0,07;N,α°) in Sv/Gy per angolo di incidenza α° : | | | | | | | | | | |
|---|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 0° | 10° | 20° | 30° | 40° | 45° | 50° | 60° | 70° | 80° |
| N10 | 0,92 | 0,92 | 0,91 | 0,89 | 0,89 | 0,88 | 0,88 | 0,82 | 0,73 | 0,59 |
| N15 | 0,96 | 0,96 | 0,96 | 0,95 | 0,96 | 0,95 | 0,95 | 0,95 | 0,92 | 0,82 |
| N20 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,98 | 0,91 |
| N25 | 1,03 | 1,03 | 1,03 | 1,03 | 1,03 | 1,03 | 1,03 | 1,03 | 1,03 | 1,01 |
| N30 | 1,11 | 1,09 | 1,09 | 1,09 | 1,09 | 1,09 | 1,09 | 1,09 | 1,08 | 1,01 |
| N40 | 1,28 | 1,27 | 1,27 | 1,27 | 1,27 | 1,27 | 1,26 | 1,25 | 1,23 | 1,14 |

9.3.3 La serie ISO "High Air-Kerma Rate series"

Tabella 9.26: Caratteristiche delle radiazioni di riferimento della serie "High Air-Kerma Rate series" (H) misurate sperimentalmente con un rivelatore al Germanio (metodo spettrometrico) specificate nella ISO 4037-1 [1]: energia media E_{media} ed energia massima E_{max} dello spettro in keV, coefficiente di omogeneità ($h = ISEV/IISEV$), risoluzione in %, fattore di kerma $k(R)$ in $pGy \cdot cm^2$. Coefficiente di conversione da kerma in aria, K_a , all'equivalente di dose ambientale, $H^*(10)$, per la sfera ICRU. Distanza sorgente-rivelatore (SDD) = 200. cm

| | E_{media} (keV) | E_{max} (keV) | I° SEV (mm) | II° SEV (mm) | Coefficiente di omogeneità | Risoluzione (%) | $k(R)$ ($pGy \cdot cm^2$) | $h^*(10;H)$ (Sv/Gy) |
|-----|----------------------|--------------------|----------------|-----------------|----------------------------------|--------------------|--------------------------------|------------------------|
| H10 | 8,6 | 10,4 | 0,050 | 0,065 | 0,77 | 45 | 11,78 | 0,011 |
| H20 | 13,3 | 20,2 | 0,145 | 0,192 | 0,76 | 82 | 5,72 | 0,16 |
| H30 | 20,1 | 30,1 | 0,41 | 0,60 | 0,68 | 75 | 2,90 | 0,54 |
| H60 | 37,3 | 59,9 | 2,50 | 3,34 | 0,75 | 78 | 1,73 | 1,31 |

Tabella 9.27: Coefficienti di conversione $h(10; H, \alpha^\circ)$ in Sv/Gy da kerma in aria, K_a , all'equivalente di dose personale, $H_p(10)$, per il fantoccio a slab e per le qualità della radiazione della serie "High Air-Kerma Rate series" (H) come specificato nella ISO 4037-1 [1]; distanza sorgente-rivelatore = 200 cm.

| h(10;H, α°) in Sv/Gy per angolo di incidenza α° : | | | | | | | | | | |
|--|-------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| | 0° | 10° | 20° | 30° | 40° | 45° | 50° | 60° | 70° | 80° |
| H10 | 0,001 | $<1 \cdot 10^{-4}$ | $<1 \cdot 10^{-4}$ | $<1 \cdot 10^{-4}$ | $<1 \cdot 10^{-4}$ | $<1 \cdot 10^{-4}$ | $<1 \cdot 10^{-4}$ | $<1 \cdot 10^{-4}$ | $<1 \cdot 10^{-4}$ | $<1 \cdot 10^{-4}$ |
| H20 | 0,12 | 0,12 | 0,11 | 0,10 | 0,08 | 0,05 | 0,04 | 0,03 | 0,01 | $<1 \cdot 10^{-4}$ |
| H30 | 0,48 | 0,48 | 0,46 | 0,43 | 0,39 | 0,35 | 0,31 | 0,24 | 0,14 | 0,05 |
| H60 | 1,31 | 1,30 | 1,29 | 1,26 | 1,19 | 1,15 | 1,10 | 0,98 | 0,77 | 0,41 |

Tabella 9.28: Coefficienti di conversione $h(0,07; H, \alpha^\circ)$ in Sv/Gy da kerma in aria, K_a , all'equivalente di dose personale, $H_p(0,07)$, per la pelle e per le qualità della radiazione della serie "High Air-Kerma Rate series" (H) come specificato nella ISO 4037-1 [1]; distanza sorgente-rivelatore = 200 cm.

| h(0,07;H, α°) in Sv/Gy per angolo di incidenza α° : | | | | | | | | | | |
|--|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 0° | 10° | 20° | 30° | 40° | 45° | 50° | 60° | 70° | 80° |
| H10 | 0,93 | 0,92 | 0,92 | 0,92 | 0,92 | 0,91 | 0,91 | 0,90 | 0,89 | 0,79 |
| H20 | 0,98 | 0,98 | 0,98 | 0,99 | 0,98 | 0,97 | 0,96 | 0,94 | 0,90 | 0,85 |
| H30 | 1,04 | 1,04 | 1,04 | 1,04 | 1,04 | 1,03 | 1,02 | 1,00 | 0,98 | 0,94 |
| H60 | 1,36 | 1,36 | 1,36 | 1,35 | 1,34 | 1,32 | 1,31 | 1,29 | 1,22 | 1,12 |

Tabella 9.29: Coefficiente di conversione $h(3; H, \alpha)$ in Sv/Gy da kerma in aria, K_a , all'equivalente di dose personale, $H_p(3)$, per il cristallino e per le qualità della radiazione della serie "High Air-Kerma Rate series" (H) [15].

$h(3; H, \alpha^\circ)$ in Sv/Gy per angolo di incidenza α° :

| | 0° | 15° | 30° | 45° | 60° | 75° |
|------------|------|------|------|------|------|------|
| H10 | 0,05 | 0,05 | 0,04 | 0,03 | 0,01 | 0,01 |
| H20 | 0,53 | 0,51 | 0,45 | 0,34 | 0,21 | 0,19 |
| H30 | 0,87 | 0,86 | 0,81 | 0,72 | 0,59 | 0,47 |
| H60 | 1,38 | 1,37 | 1,36 | 1,30 | 1,20 | 0,97 |

Tabella 9.30: Coefficienti di conversione $h'(0,07; H, \alpha^\circ)$ in Sv/Gy da kerma in aria, K_a , all'equivalente di dose direzionale, $H'(0,07, \Omega)$, per la sfera ICRU e per le qualità della radiazione della serie "High Air-Kerma Rate series" (H) come specificato nella ISO 4037-1 [1]; distanza sorgente-rivelatore = 200 cm.

| | 0° | 10° | 20° | 30° | 40° | 45° | 50° | 60° | 70° | 80° |
|------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| H10 | 0,84 | 0,84 | 0,83 | 0,80 | 0,80 | 0,78 | 0,77 | 0,67 | 0,54 | 0,39 |
| H20 | 0,95 | 0,95 | 0,94 | 0,93 | 0,94 | 0,93 | 0,93 | 0,90 | 0,85 | 0,74 |
| H30 | 1,03 | 1,03 | 1,02 | 1,02 | 1,02 | 1,02 | 1,02 | 1,02 | 1,00 | 0,92 |
| H60 | 1,33 | 1,32 | 1,31 | 1,31 | 1,31 | 1,31 | 1,31 | 1,29 | 1,26 | 1,17 |

Capitolo 10

Considerazioni riassuntive sui risultati ottenuti

Una prima verifica a conferma dell'esattezza del metodo di ricostruzione messo a punto, consiste in generale nel confrontare la quantità integrale *spessore emivalente* ottenuta sperimentalmente per ogni fascio studiato con la stessa quantità ricavata applicando il metodo spettrometrico. Tale tipo di confronto permette di giudicare, a valle dell'applicazione della metodologia di ricostruzione, la validità della stessa a fronte di una quantità macroscopica tradizionalmente impiegata per fornire un indice correlato alla qualità del fascio specifico.

I valori delle misure di primo e secondo spessore emivalente ottenuti con la camera a ionizzazione cilindrica ad aria libera su ogni fascio X filtrato (metodo dosimetrico) e dal calcolo sugli spettri ricostruiti (metodo spettrometrico) sono riassunti in Tabella 10.1. Come riportato in dettaglio in Tabella 10.2 è evidente il buon accordo tra i dati ottenuti con i due diversi metodi con una discrepanza massima dell'ordine di $\pm 5\%$, fluttuazioni che rientrano nelle incertezze di misura. Questo permette di affermare che gli spettri ricostruiti con la procedura messa a punto corrispondono agli spettri reali.

Gli spettri sono stati inoltre caratterizzati anche in termini di energia media e risoluzione spettrale [1] come richiesto dalla normativa (Tab. 10.3). In tabella è riportato anche, per ogni fascio, il valore della tensione applicata al tubo, in modo da avere una informazione di quanto percentualmente si discosta dal valore di tensione nominale, nonostante non ci siano raccomandazioni in merito.

I fasci da noi caratterizzati concordano con quanto raccomandato dalla normativa ISO 4037-1 [1] di riferimento (unica norma disponibile che riporta i valori di energia media e risoluzione): deviazione massima del $\pm 5\%$ in termini di energia media e $\pm 15\%$ in termini di risoluzione. Per quanto riguarda i valori di energia media ottenuti sugli spettri ricostruiti, i fasci a più bassa energia della serie L e N presentano valori più bassi rispetto a quanto riportato dalla normativa ISO 4037-1 [1].

In Tabella 10.4 sono tabulati, per ogni fascio X filtrato, i risultati ottenuti per quanto riguarda i coefficienti di conversione, con angolo di incidenza normale al punto di misura. I valori sono stati confrontati con quanto riportato dalla

normativa ISO 4037-3 [5] per tutte le serie analizzate e, laddove i dati non erano disponibili nella ISO, sono stati confrontati con quelli ottenuti da altri laboratori europei [10, 12].

I coefficienti di conversione determinati presentano un buon accordo con i citati dati di letteratura per quanto riguarda $H_p(0,07)$ e $H'(0,07)$ con una variabilità generalmente all'interno del $\pm 5\%$. Per quanto riguarda invece $H_p(10)$ e $H^*(10)$ esistono discordanze anche dell'ordine del 100%. L'accordo fra i dati è sicuramente peggiore per i fasci X filtrati di più bassa energia sia rispetto alla normativa sia ai valori pubblicati da altri laboratori, ma questo non è sorprendente in quanto legato alla forte dipendenza dall'energia dei coefficienti di conversione $h_p(10; R)$ e $h^*(10; R)$. Per quanto riguarda i coefficienti di conversione $h_p(3; R)$ per il cristallino non è stato possibile effettuare alcun confronto non essendo riportati nè nella normativa nè da altro laboratorio.

Una dettagliata analisi delle incertezze da associare ai coefficienti di conversione è molto complessa in quanto potenzialmente sono molti i fattori (legati alla misura dello spettro o alla sua ricostruzione) che possono influenzare il risultato tra cui: una corretta acquisizione degli spettri, la calibrazione in energia ed efficienza dello spettrometro, la variabilità stocastica del numero di fotoni osservati. Da dati di letteratura [12, 10], è possibile comunque affermare che l'incertezza da associare al valore dei coefficienti di conversione di 1,5% suggerita nella ISO 4037-4 [6] costituisca una visione troppo ottimistica.

I risultati presentati hanno dimostrato inoltre l'importanza di caratterizzare, nel dominio energetico studiato, ogni fascio in modo individuale, in quanto il solo metodo dosimetrico, cioè la misura classica degli spessori emivalenti, non permette la completa conoscenza di tutte le caratteristiche dello spettro stesso. In particolare, nonostante alcuni spettri presentino una energia media elevata, la presenza di una componente non trascurabile di bassa energia si ripercuote sul valore del coefficiente di conversione da kerma in aria all'equivalente di dose personale o ambientale in maniera preponderante. Tali analisi sono state rese possibili solo grazie all'applicazione di una tecnica di ricostruzione (stripping), mediante la quale si è ottenuta la reale distribuzione dello spettro incidente sul rivelatore. Per una ulteriore verifica indipendente è stata applicata ad ogni fascio ricostruito la funzione risposta del rivelatore ottenuta con simulazioni numeriche (MCNP-4C). Applicando la matrice risposta ad uno spettro precedentemente ricostruito si è ottenuto lo spettro dei conteggi, il quale è stato poi confrontato con il corrispondente spettro acquisito sperimentalmente. I risultati ottenuti hanno confermato che il metodo di ricostruzione applicato è corretto.

Per quanto riguarda i valori ottenuti per i coefficienti di conversione, è stato ampiamente dimostrato che, laddove presentano una forte dipendenza dall'energia e cioè per energie inferiori a 20 keV circa è indispensabile conoscere la distribuzione spettrale dei fotoni emessi dal tubo impiegato.

Lo studio è stato esteso, inoltre, a fasci di energia superiore, L35, N40 e H60 (dando la possibilità di confronti con gli stessi fasci prodotti da impianti diversi e precedentemente caratterizzati) e due fasci non ancora standardizzati rispettivamente di 5 kV e 7,5 kV, in modo da permettere interconfronti con altri Laboratori di metrologia spingendoci verso energie molto basse.

Tabella 10.1: Confronto tra i valori di spessore emivalente ottenuti dalla misura con camera a ionizzazione e calcolati dagli spettri ricostruiti.

| Fascio X filtrato | Spessori emivalenti misurati con camera a ionizzazione (a) | | | | | | Spessori emivalenti calcolati dagli spettri ricostruiti (b) | | | | | | ISO 4037-1 | |
|----------------------|--|---------|--------|---------|---------|---------|---|---------|--------|---------|---------|---------|------------|---------|
| | 100 cm* | | | 200 cm* | | | 100 cm* | | | 200 cm* | | | | |
| | I° SEV | II° SEV | I° SEV | I° SEV | II° SEV | II° SEV | I° SEV | II° SEV | I° SEV | I° SEV | II° SEV | II° SEV | I° SEV | II° SEV |
| L10 | 0,058 | - | 0,07 | - | 0,057 | 0,058 | 0,058 | 0,06 | 0,06 | 0,058 | 0,058 | 0,058 | 0,058 | 0,058 |
| L20 | 0,42 | - | 0,44 | - | 0,4 | 0,41 | 0,44 | 0,48 | 0,48 | 0,42 | 0,42 | 0,42 | 0,42 | 0,42 |
| L30 | 1,49 | - | 1,68 | - | 1,51 | 1,55 | 1,57 | 1,63 | 1,63 | 1,46 | 1,46 | 1,46 | 1,46 | 1,46 |
| L35 | 2,26 | - | 2,62 | - | 2,28 | 2,3 | 2,60 | 2,62 | 2,62 | 2,20 | 2,20 | 2,20 | 2,20 | 2,20 |
| | | | | | | | | | | | | | | |
| N10 | 0,047 | 0,054 | 0,058 | 0,063 | 0,048 | 0,053 | 0,056 | 0,063 | 0,047 | 0,052 | 0,052 | 0,052 | 0,047 | 0,052 |
| N15 | 0,14 | 0,17 | 0,16 | 0,18 | 0,14 | 0,16 | 0,16 | 0,17 | 0,14 | 0,16 | 0,16 | 0,16 | 0,14 | 0,16 |
| N20 | 0,32 | 0,37 | 0,34 | 0,37 | 0,32 | 0,35 | 0,34 | 0,36 | 0,32 | 0,37 | 0,37 | 0,37 | 0,32 | 0,37 |
| N25 | 0,67 | 0,74 | 0,67 | 0,77 | 0,66 | 0,74 | 0,67 | 0,75 | 0,66 | 0,73 | 0,73 | 0,73 | 0,66 | 0,73 |
| N30 | 1,15 | 1,27 | 1,22 | 1,25 | 1,15 | 1,27 | 1,22 | 1,24 | 1,15 | 1,30 | 1,30 | 1,30 | 1,15 | 1,30 |
| N40 | 2,80 | 2,97 | 2,81 | 3,04 | 2,80 | 2,97 | 2,80 | 3,04 | 2,70 | 3,00 | 3,00 | 3,00 | 2,70 | 3,00 |
| | | | | | | | | | | | | | | |
| H10 | 0,04 | 0,04 | 0,05 | 0,065 | 0,04 | 0,04 | 0,05 | 0,065 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 |
| H20 | 0,12 | 0,15 | 0,145 | 0,192 | 0,12 | 0,15 | 0,145 | 0,192 | 0,11 | 0,11 | 0,11 | 0,11 | 0,11 | 0,11 |
| H30 | 0,36 | 0,54 | 0,41 | 0,59 | 0,36 | 0,58 | 0,41 | 0,60 | 0,35 | 0,35 | 0,35 | 0,35 | 0,35 | 0,35 |
| H60 | 2,40 | 3,26 | 2,40 | 3,32 | 2,40 | 3,48 | 2,50 | 3,34 | 2,40 | 2,40 | 2,40 | 2,40 | 2,40 | 2,40 |

* distanza sorgente di radiazione – punto di misura

Tabella 10.2: *Differenza percentuale tra primo e secondo spessore emivalente ottenuto dalla misura diretta con camera a ionizzazione e dal calcolo sullo spettro ricostruito.*

| Fascio X filtrato | Confronto a/b | | | |
|------------------------------|----------------------|---------|--------|---------|
| | 100 cm | | 200 cm | |
| | I° SEV | II° SEV | I° SEV | II° SEV |
| L10 | 1,02 | - | 1,17 | - |
| L20 | 1,05 | - | 1,00 | - |
| L30 | 0,99 | - | 1,07 | - |
| L35 | 0,99 | - | 1,00 | - |
| N10 | 0,98 | 1,02 | 1,04 | 1,00 |
| N15 | 1,00 | 1,06 | 1,00 | 1,06 |
| N20 | 1,00 | 1,06 | 1,00 | 1,03 |
| N25 | 1,02 | 1,00 | 1,00 | 1,03 |
| N30 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,01 |
| N40 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 |
| H10 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 |
| H20 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 |
| H30 | 1,00 | 0,93 | 1,00 | 0,98 |
| H60 | 1,00 | 0,94 | 0,96 | 0,99 |

Tabella 10.3: *Energia media (E_m) e risoluzione spettrale (R_E) per i fasci X filtrati utilizzati nel Centro di Metrologia ENEA.*

| Fascio X filtrato | Spettri ENEA | | | ISO 4037-1 | |
|------------------------------|---------------------|----------------|--------------|-------------------|--------------|
| | Tensione (kV) | E_m (keV) | R_E (%) | E_m (keV) | R_E (%) |
| L10 | 9,0 | 8,2 | 19 | 8,5 | - |
| L20 | 18,1 | 16,1 | 19 | 17 | 21 |
| L30 | 29,3 | 26,1 | 18 | 26 | 21 |
| L35 | 35,0 | 30,5 | 21 | 30 | 21 |
| N10 | 9,6 | 8,2 | 27 | 8 | 28 |
| N15 | 14,1 | 11,7 | 28 | 12 | 33 |
| N20 | 18,5 | 15,3 | 32 | 16 | 34 |
| N25 | 24,0 | 19,4 | 30 | 20 | 33 |
| N30 | 29,0 | 24,0 | 30 | 24 | 32 |
| N40 | 40,0 | 33,5 | 28 | 33 | 30 |
| H10 | 10,0 | 8,6 | 45 | 7,5 | - |
| H20 | 20,0 | 13,3 | 82 | 12,9 | - |
| H30 | 30,0 | 20,1 | 75 | 19,7 | - |
| H60 | 60,0 | 37,3 | 78 | 37,3 | - |

Tabella 10.4: Confronto dei coefficienti di conversione da kerma in aria alle grandezze $H_p(10)$, $H_p(0,07)$ $H'(0,07)$ $H^*(10)$. I valori confrontati sono quelli ottenuti ad una distanza sorgente - punto di misura pari a 200 cm.

| Fasci X filtrati | $h_p(10;R,0^\circ)^\wedge$ | | | | | R(0°) (dato ENE/ISO) |
|---------------------|--|------------|------------------------------------|----------------------------------|--|----------------------------|
| | Determinati dallo spettro ricostruito in conteggi, ENE | ISO 4037-3 | Altri Laboratori | | | |
| | | | Ankerhold et al. (PTB, Germany) | Hakanen et al. (STUK,Finland) | | |
| L10 | 0,000416 | - | 0,00236 | | | 0,18* |
| L20 | 0,41 | 0,37 | 0,405 | | | 1,11 |
| L30 | 0,93 | 0,91 | 0,944 | | | 1,02 |
| L35 | 1,10 | 1,09 | 1,11 | | | 1,01 |
| | | | | | | |
| N10 | 0,000756 | - | 0,002 | - | | 0,38* |
| N15 | 0,08 | 0,06 | 0,101 | 0,064 | | 1,33 |
| N20 | 0,29 | 0,27 | 0,333 | 0,28 | | 1,07 |
| N25 | 0,55 | 0,55 | 0,581 | 0,56 | | 1,00 |
| N30 | 0,79 | 0,79 | 0,818 | 0,79 | | 1,00 |
| N40 | 1,22 | 1,17 | 1,21 | 1,19 | | 1,04 |
| | | | | | | |
| H10 | 0,001 | - | 0,000726 | | | 1,38* |
| H20 | 0,08 | - | 0,0995 | | | 0,80* |
| H30 | 0,45 | 0,39 | 0,389 | | | 1,15 |
| H60 | 1,21 | 1,19 | 1,22 | | | 1,02 |

[^]distanza sorgente-punto di misura = 200 cm

* in mancanza di un dato ISO il confronto è stato fatto tra Laboratori.

| Fasci X filtrati | $h_p(0,07;R,0^\circ)^\wedge$ | | | | | |
|---------------------|---|------------|------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|--|
| | Determinati dallo spettro ricostruito in conteggi, ENEA | ISO 4037-3 | Altri Laboratori | | R(0°) (dato ENEAIISO) | |
| | | | Ankerhold et al. (PTB, Germany) | Hakanen et al. (STUK, Finland) | | |
| L10 | 0,92 | 0,91 | 0,936 | - | 1,01 | |
| L20 | 1,00 | 0,99 | 0,992 | - | 1,01 | |
| L30 | 1,04 | 0,03 | 1,04 | - | 1,00 | |
| L35 | 1,06 | 1,06 | 1,06 | - | 1,00 | |
| | | | | | | |
| N10 | 0,92 | 0,91 | 0,861 | - | 1,01 | |
| N15 | 1,01 | 0,95 | 0,922 | 0,96 | 1,06 | |
| N20 | 1,00 | 0,98 | 0,959 | 0,99 | 1,02 | |
| N25 | 1,03 | 1,00 | 0,983 | 1,04 | 1,03 | |
| N30 | 1,11 | 1,03 | 1,03 | 1,11 | 1,08 | |
| N40 | 1,29 | 1,07 | 1,07 | 1,27 | 1,21 | |
| | | | | | | |
| H10 | 0,93 | 0,89 | 0,000726 | - | 1,04 | |
| H20 | 0,98 | 0,95 | 0,0995 | - | 1,03 | |
| H30 | 1,04 | 0,99 | 0,389 | - | 1,05 | |
| H60 | 1,36 | 1,07 | 1,22 | - | 1,27 | |

(b) ^distanza sorgente-punto di misura = 200 cm

(c)

| Fasci X filtrati | h'(0,07;R,0°)^ | | | | | R(0°) (dato ENE/ISO) |
|---------------------|--|------------|------------------------------------|-----------------------------------|--|----------------------------|
| | Determinati dallo spettro ricostruito in conteggi, ENE | ISO 4037-3 | Altri Laboratori | | | |
| | | | Ankerhold et al. (PTB, Germany) | Hakanen et al. (STUK, Finland) | | |
| L10 | 0,92 | 0,93 | 0,907 | - | | 0,99 |
| L20 | 1,00 | 1,01 | 1,02 | - | | 0,99 |
| L30 | 1,15 | 1,13 | 1,16 | - | | 1,02 |
| L35 | 1,39 | 1,22 | 1,22 | - | | 1,14 |
| | | | | | | |
| N10 | 0,92 | 0,91 | 0,885 | - | | 1,01 |
| N15 | 1,00 | 0,96 | 0,967 | 0,96 | | 1,04 |
| N20 | 1,00 | 1,00 | 1,01 | 1,00 | | 1,00 |
| N25 | 1,03 | 1,03 | 1,05 | 1,03 | | 1,00 |
| N30 | 1,11 | 1,10 | 1,12 | 1,10 | | 1,01 |
| N40 | 1,30 | 1,25 | 1,26 | 1,59 | | 1,04 |
| | | | | | | |
| H10 | 0,84 | 0,89 | 0,863 | - | | 0,94 |
| H20 | 0,95 | 0,96 | 0,953 | - | | 0,99 |
| H30 | 1,03 | 1,02 | 1,02 | - | | 1,01 |
| H60 | 1,33 | 1,26 | 1,27 | - | | 1,06 |

^distanza sorgente-punto di misura = 200 cm

(d)

| Fasci X filtrati | h*(10;R)^ | | | | |
|---------------------|---|------------|------------------------------------|-----------------------------------|--------------------------|
| | Determinati dallo spettro ricostruito in conteggi, ENEA | ISO 4037-3 | Altri Laboratori | | R(0°) (dato ENEA/ISO) |
| | | | Ankerhold et al. (PTB, Germany) | Hakanen et al. (STUK, Finland) | |
| L10 | 0,008 | - | 0,00210 | - | 3,80* |
| L20 | 0,37 | 0,37 | 0,393 | - | 1,00 |
| L30 | 0,97 | 0,90 | 0,937 | - | 1,08 |
| L35 | 1,44 | 1,08 | 1,09 | - | 1,33 |
| | | | | | |
| N10 | 0,006 | - | 0,001 | - | 6,00* |
| N15 | 0,11 | - | 0,0872 | 0,064 | 1,26* |
| N20 | 0,32 | - | 0,307 | 0,27 | 1,04* |
| N25 | 0,57 | 0,52 | 0,566 | 0,55 | 1,10 |
| N30 | 0,86 | 0,80 | 0,810 | 0,78 | 1,08 |
| N40 | 1,26 | 1,18 | 1,19 | 1,18 | 1,07 |
| | | | | | |
| H10 | 0,011 | - | 0,000646 | - | 17,03* |
| H20 | 0,16 | - | 0,0972 | - | 1,65* |
| H30 | 0,54 | - | 0,383 | - | 1,41* |
| H60 | 1,31 | 1,15 | 1,19 | - | 1,14 |

^distanza sorgente-punto di misura = 200 cm

* in mancanza di un dato ISO il confronto è stato fatto tra Laboratori.

Capitolo 11

Conclusioni e prospettive

Il lavoro svolto ha messo in luce la complessità delle procedure necessarie per la caratterizzazione in termini metrologici di fasci X di riferimento di bassa energia. Il campo di ricerca associato a questo dominio di energia è piuttosto vasto come già nella parte introduttiva è stato illustrato.

Dovendo operare a valori così bassi di energia, è stato evidenziato come ogni parametro (trascurato nel caso di energia più elevata) può giocare un ruolo molto significativo nella caratterizzazione di questi campi fotonici.

E' stato perciò di particolare importanza un accoppiamento delle potenzialità sperimentali con le competenze di tipo modellistico (metodo Monte Carlo). Ciò ha permesso di condurre uno studio accurato, che ha prodotto una serie di risultati particolarmente soddisfacenti.

In particolare in questo tipo di studio, la modellazione numerica ha consentito una valutazione abbastanza precisa dello strato morto (*dead layer*) di cui devono essere però evidenziati alcuni limiti metodologici. Infatti non è stato possibile disporre di un sufficiente numero di valori sperimentali a bassa energia che avvalorassero in modo totalmente esauriente le stime numeriche.

Una futura linea di studio consiste nella ricerca dello strato morto del rivelatore HPGe avvalendosi di irraggiamenti laterali con luce di sincrotrone molto collimata [30].

E' inoltre pensabile lo sviluppo di una completa procedura automatica di deconvoluzione degli spettri dei conteggi (*unfolding*) basata su algoritmi di inversione della matrice risposta valutata con metodo Monte Carlo e già presentata in questo lavoro.

In definitiva il lavoro qui presentato ha consentito la qualificazione ed il possibile impiego di una catena di acquisizione sperimentale di X di bassa energia con possibilità di uso in diversi campi di ricerca, non solo legati alla dosimetria per la radioprotezione. Grazie a questo lavoro ENEA-IRP costituisce al momento il primo Centro di Taratura in Italia che dispone di una serie di fasci interamente caratterizzati nel campo delle basse energie.

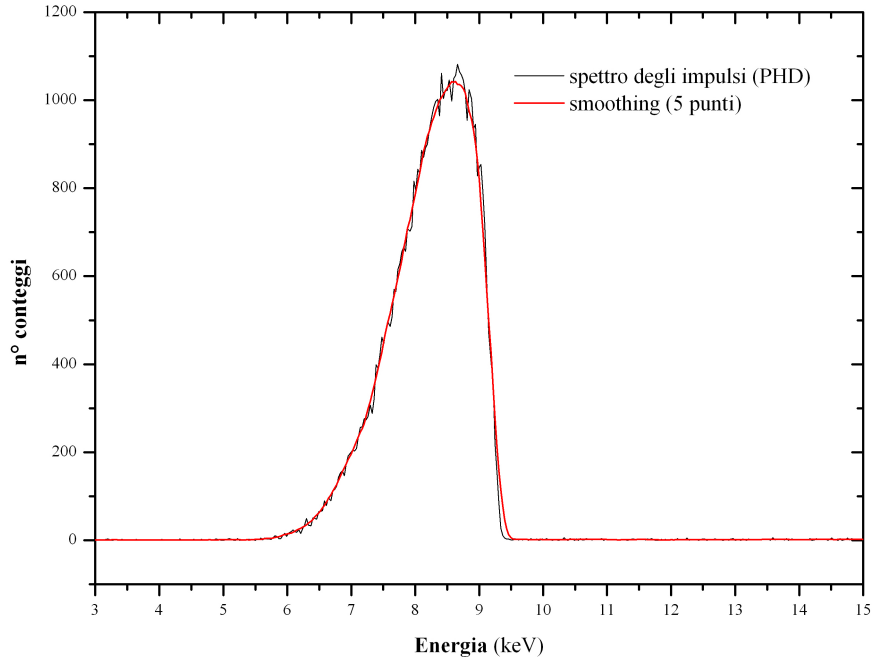
Appendice A

Distribuzioni degli spettri degli impulsi (PHD)

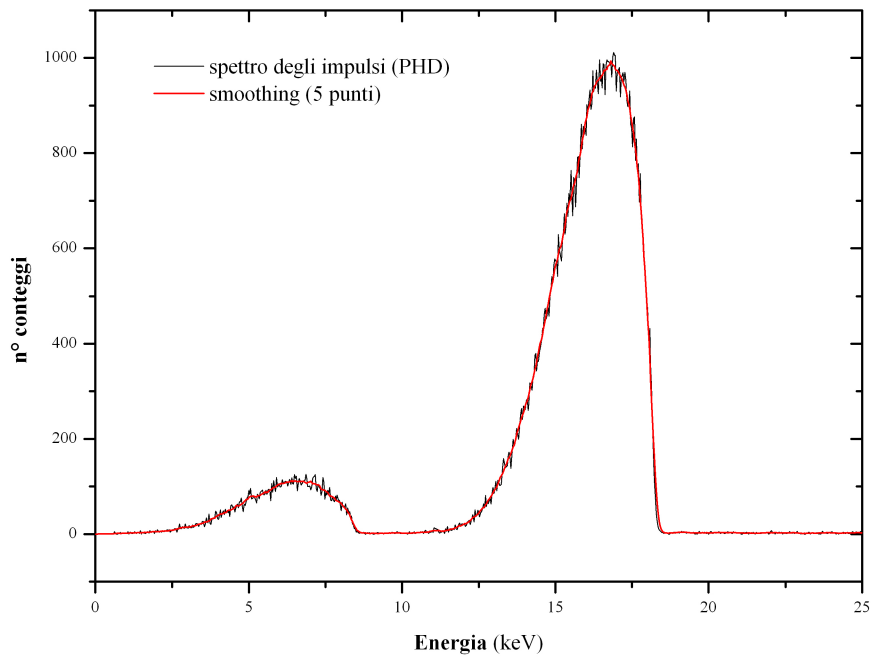
Qui di seguito vengono presentati tutti gli spettri degli impulsi acquisiti, con E_{max} inferiore a 60 keV, e dopo l'applicazione del filtro di Savitzky-Golay (ottenuto con un software commerciale ORIGIN 8) in modo da eliminare il rumore elettronico mantenendo la forma dello spettro.

A.1 Distanza sorgente-rivelatore = 50 cm.

A.1.1 Serie L

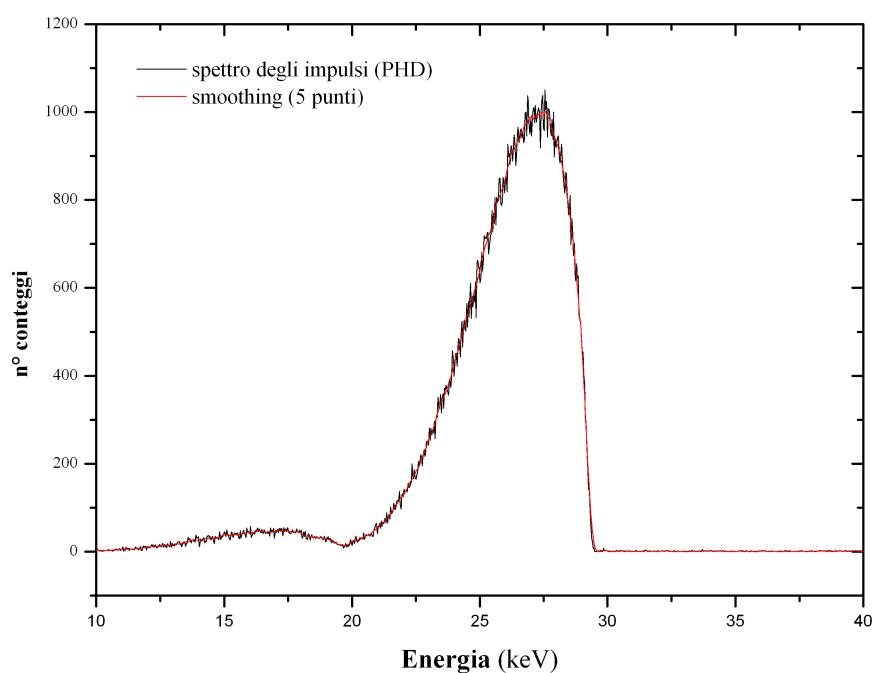


(a) L10

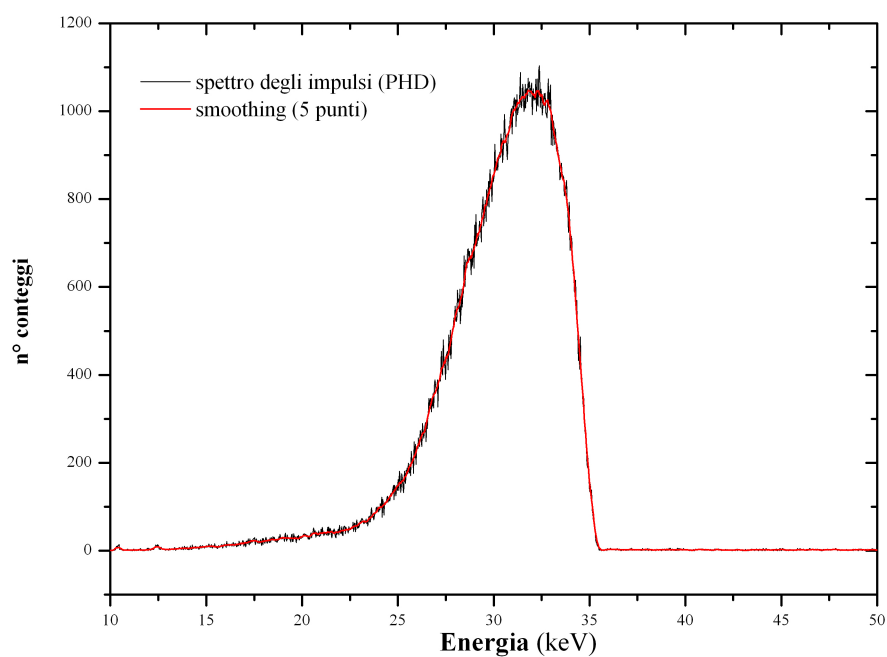


(b) L20

Figura A.1: *Spettro degli impulsi (PHD = Pulse High Distribution) dei fasci L10 (a) e L20 (b) della serie "Low air-kerma rate series" (L). Distanza sorgente-rivelatore = 50 cm.*



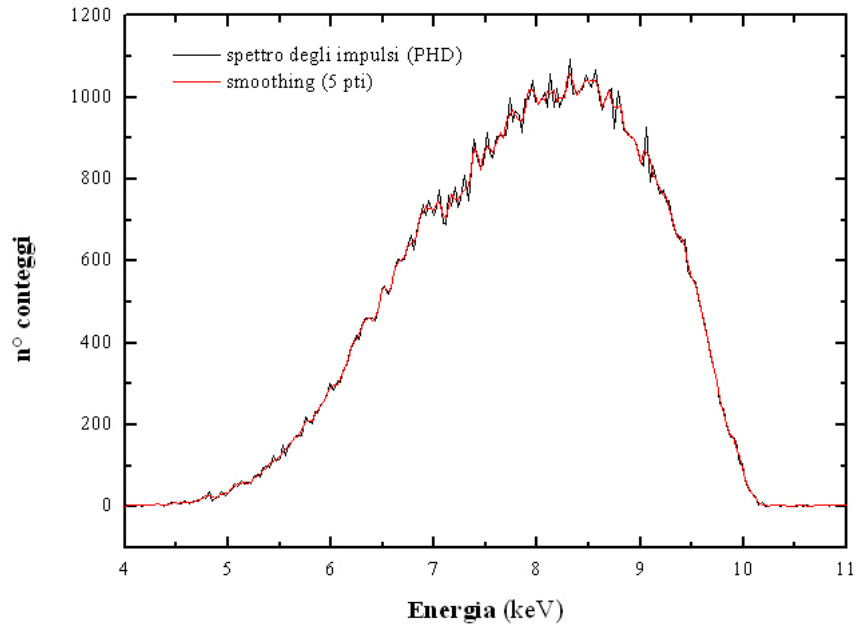
(a) L30



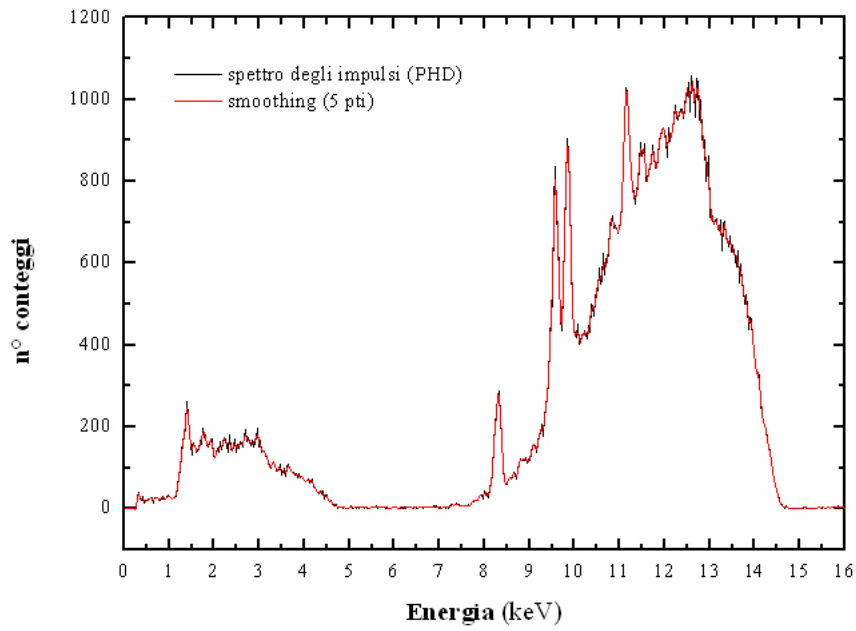
(b) L35

Figura A.2: *Spettro degli impulsi (PHD = Pulse High Distribution) dei fasci L30 (a) e L35 (b) della serie Low air-kerma rate series" (L). Distanza sorgente-rivelatore = 50 cm.*

A.1.2 Serie N

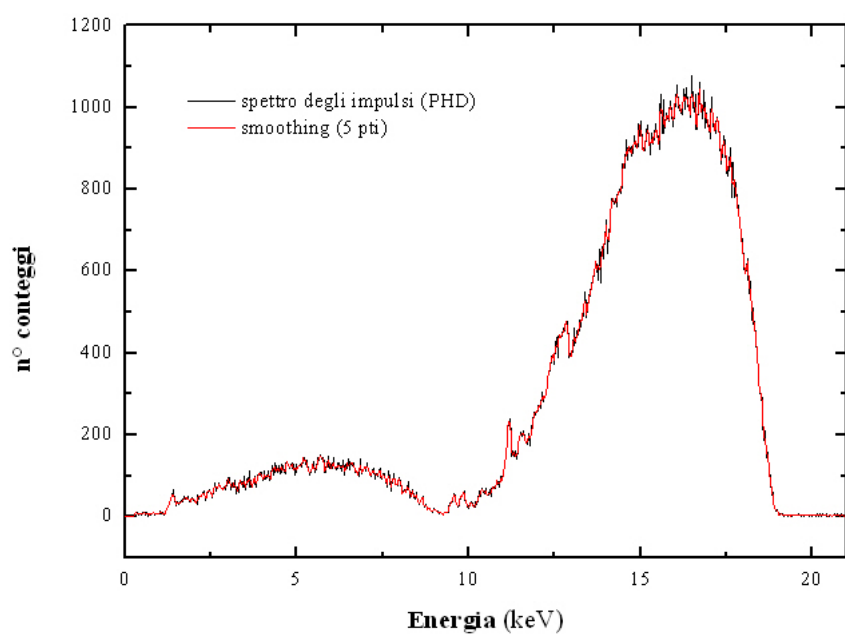


(a) N10

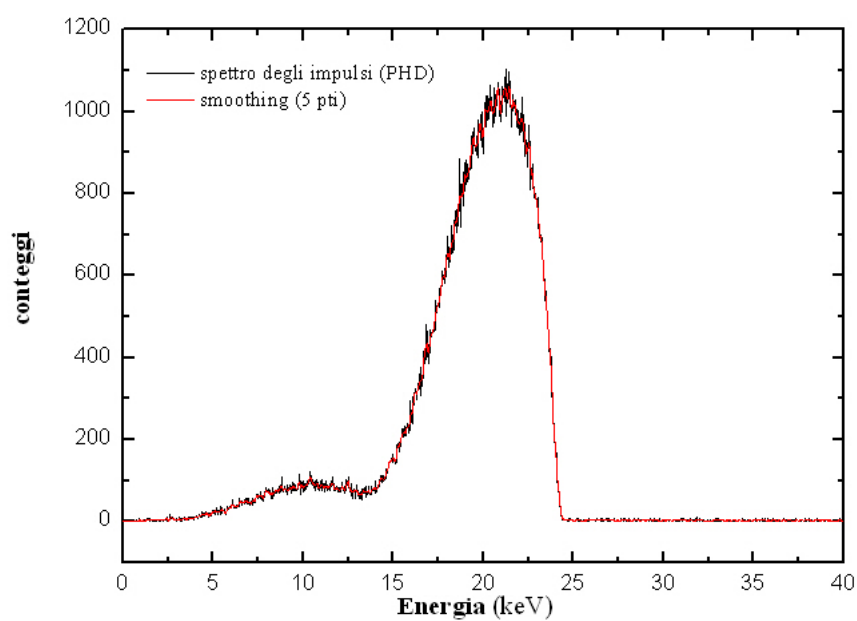


(b) N15

Figura A.3: *Spettro degli impulsi (PHD = Pulse High Distribution) dei fasci N10 (a) e N15 (b) della serie "Narrow-spectrum series" (N). Distanza sorgente-rivelatore = 50 cm.*

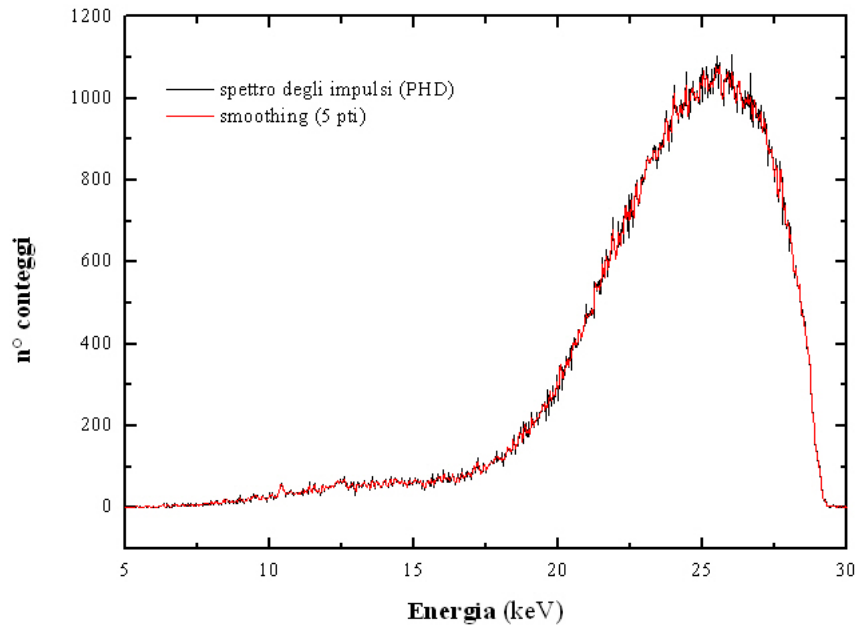


(a) N20

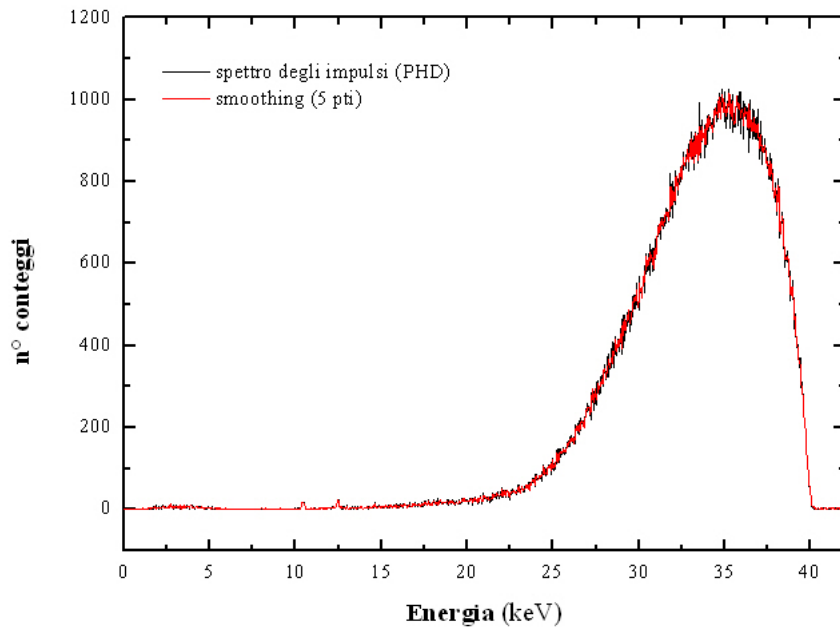


(b) N25

Figura A.4: *Spettro degli impulsi (PHD = Pulse High Distribution) dei fasci N20 (a) e N25 (b) della serie "Narrow-spectrum series" (N). Distanza sorgente-rivelatore = 50 cm.*



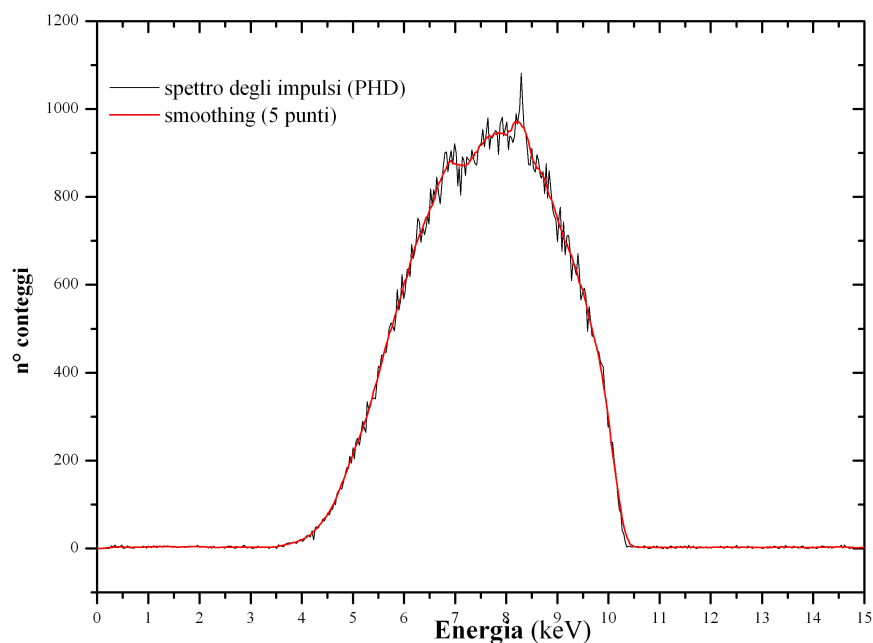
(a) N30



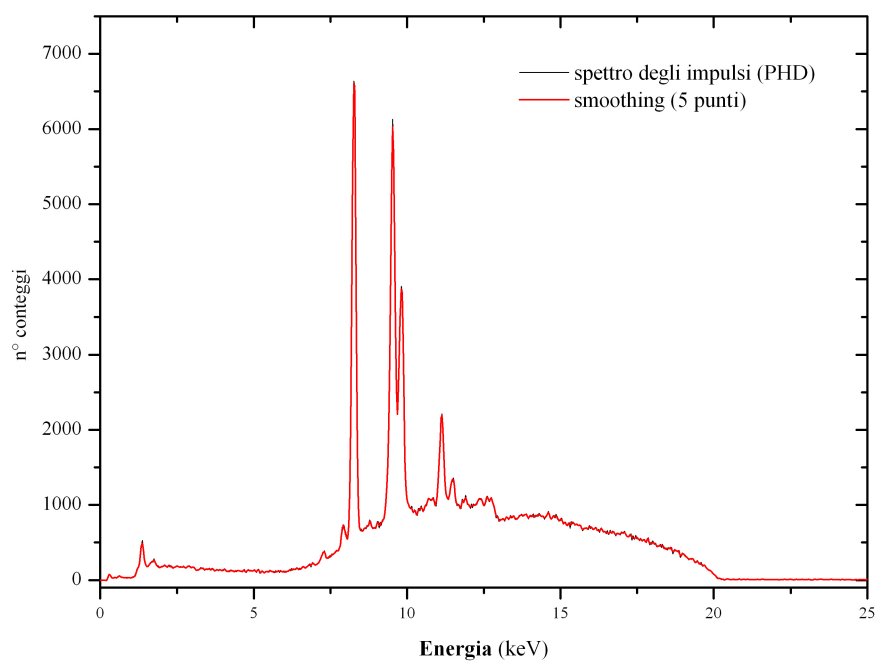
(b) N40

Figura A.5: *Spettro degli impulsi (PHD = Pulse High Distribution) dei fasci N30 (a) e N40 (b) della serie "Narrow-spectrum series" (N). Distanza sorgente-rivelatore = 50 cm.*

A.1.3 Serie H

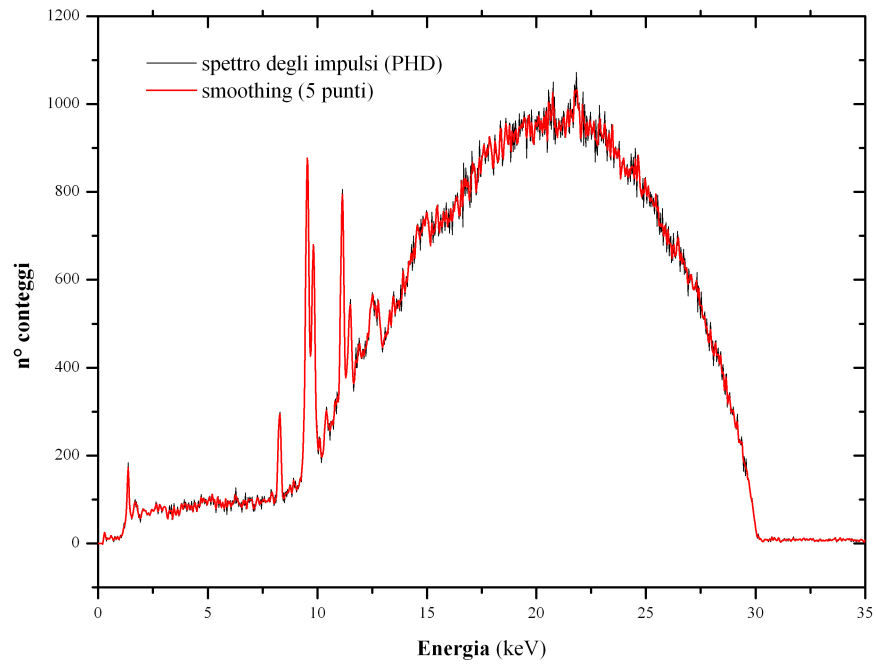


(a) H10

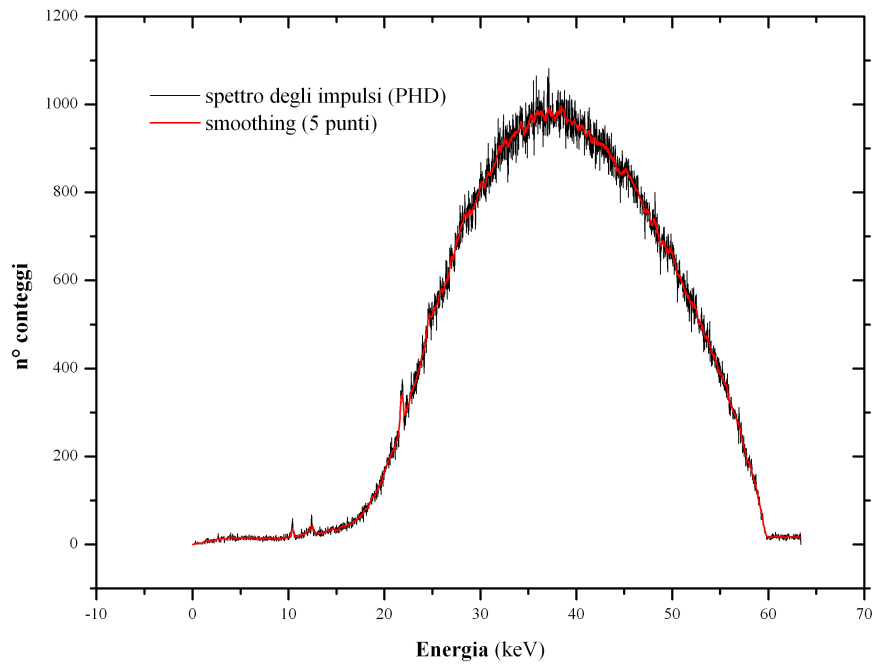


(b) H20

Figura A.6: *Spettro degli impulsi (PHD = Pulse High Distribution) dei fasci H10 (a) e H20 (b) della serie "High air-kerma rate series" (H). Distanza sorgente-rivelatore = 50 cm.*



(a) H30

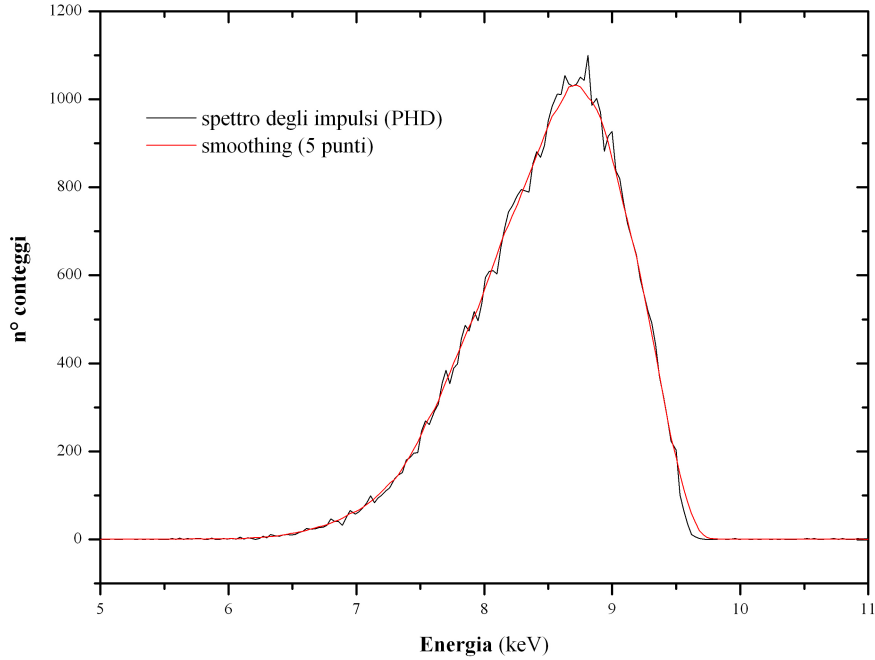


(b) H60

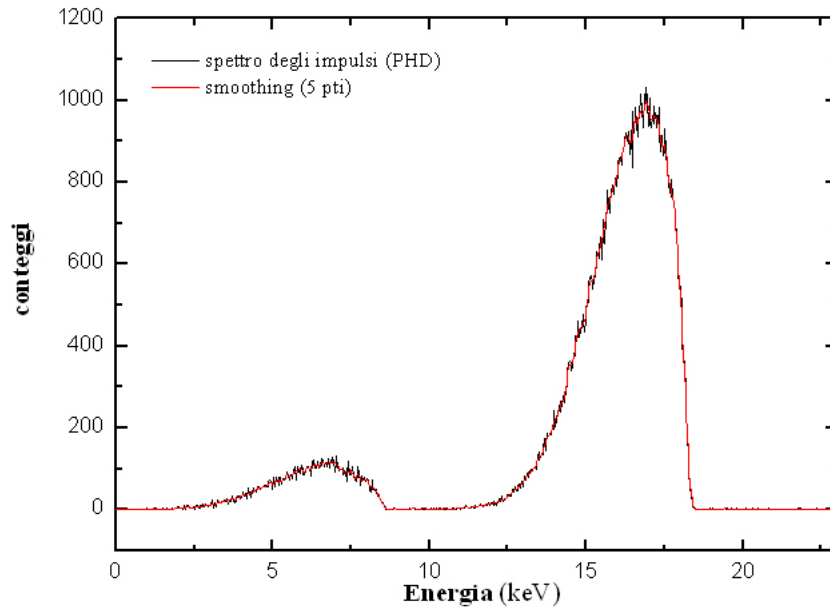
Figura A.7: *Spettro degli impulsi (PHD = Pulse High Distribution) dei fasci H30 (a) e H60 (b) della serie "High air-kerma rate series" (H). Distanza sorgente-rivelatore = 50 cm.*

A.2 Distanza sorgente-rivelatore = 200 cm.

A.2.1 Serie L

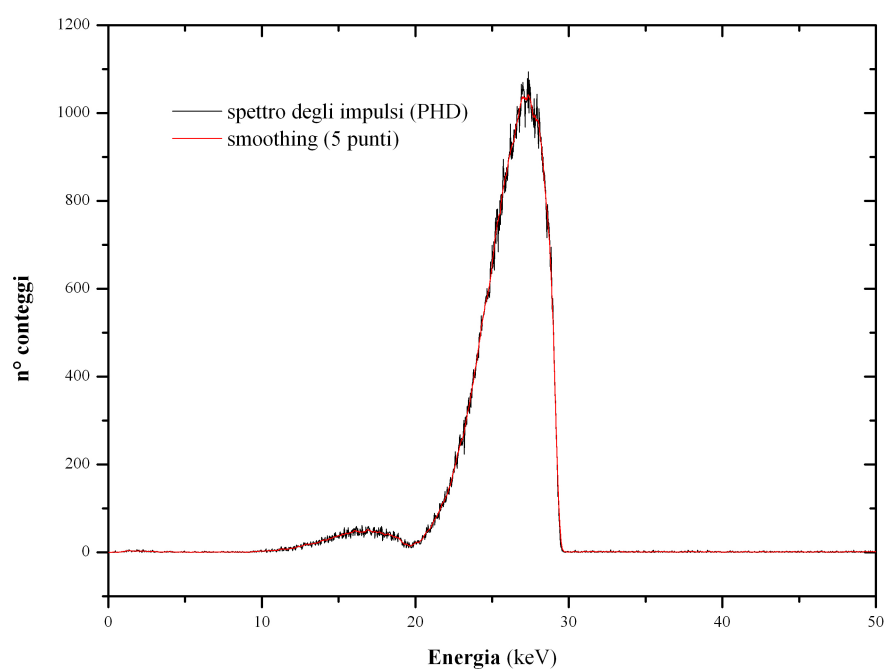


(a) L10

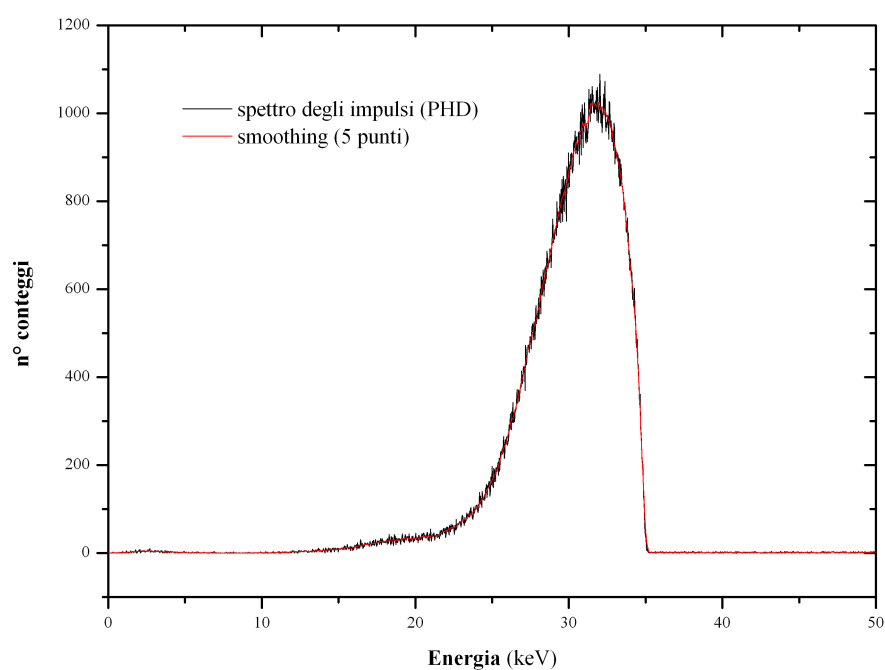


(b) L20

Figura A.8: *Spettro degli impulsi (PHD = Pulse High Distribution) dei fasci L10 (a) e L20 (b) della serie "Low air-kerma rate series" (L). Distanza sorgente-rivelatore = 200 cm.*



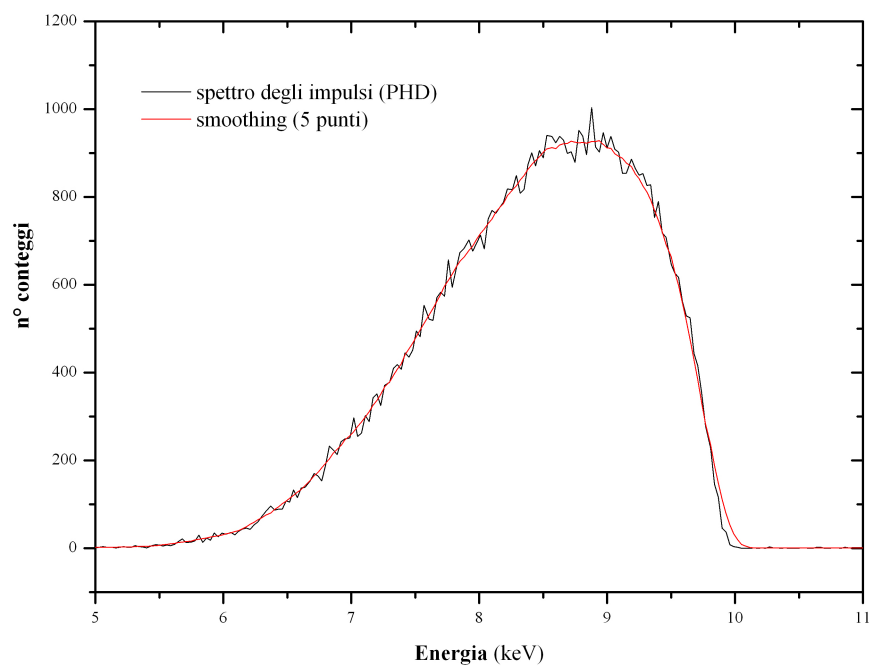
(a) L30



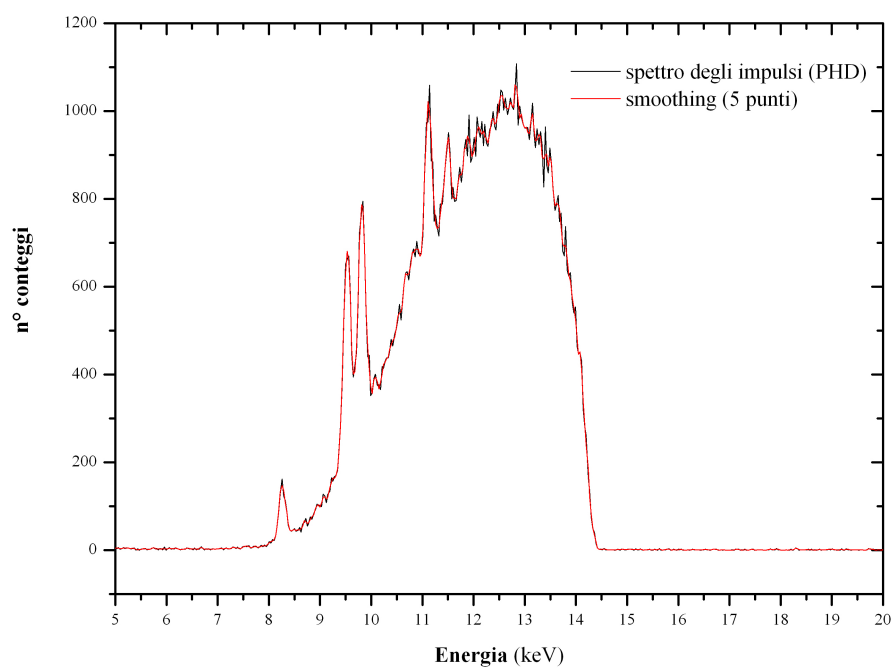
(b) L35

Figura A.9: *Spettro degli impulsi (PHD = Pulse High Distribution) dei fasci L30 (a) e L35 (b) della serie Low air-kerma rate series" (L). Distanza sorgente-rivelatore = 200 cm.*

A.2.2 Serie N

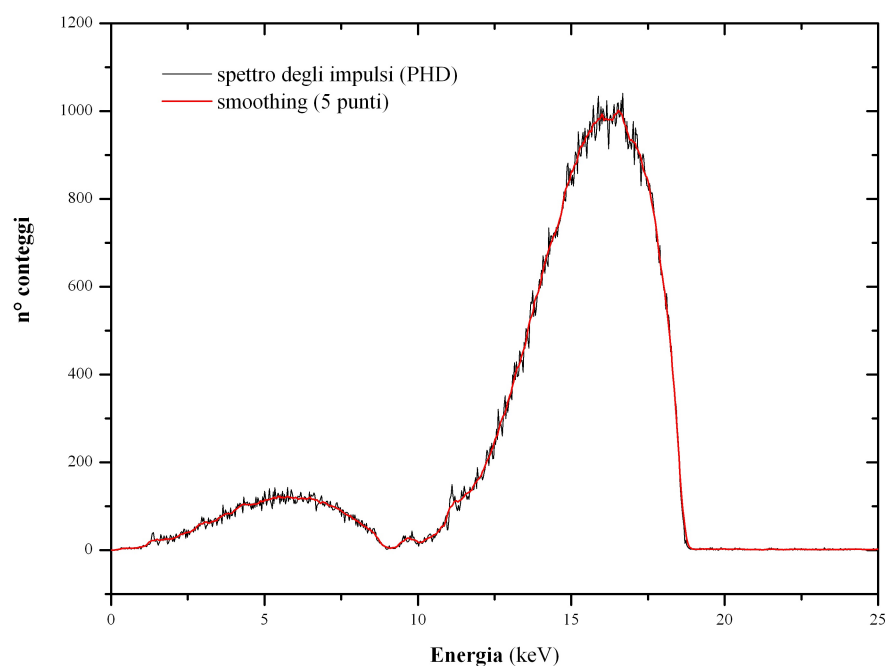


(a) N10

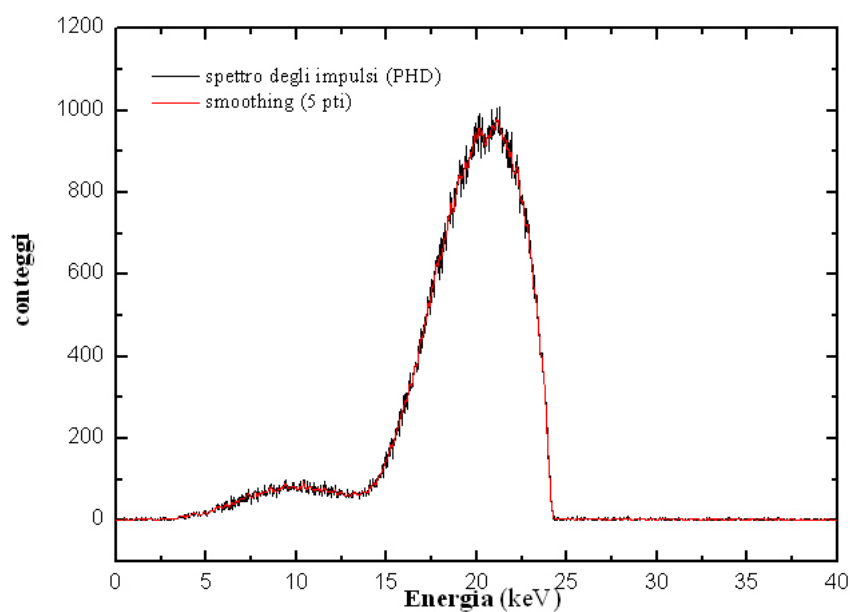


(b) N15

Figura A.10: *Spettro degli impulsi (PHD = Pulse High Distribution) dei fasci N10 (a) e N15 (b) della serie "Narrow-spectrum series" (N). Distanza sorgente-rivelatore = 200 cm.*

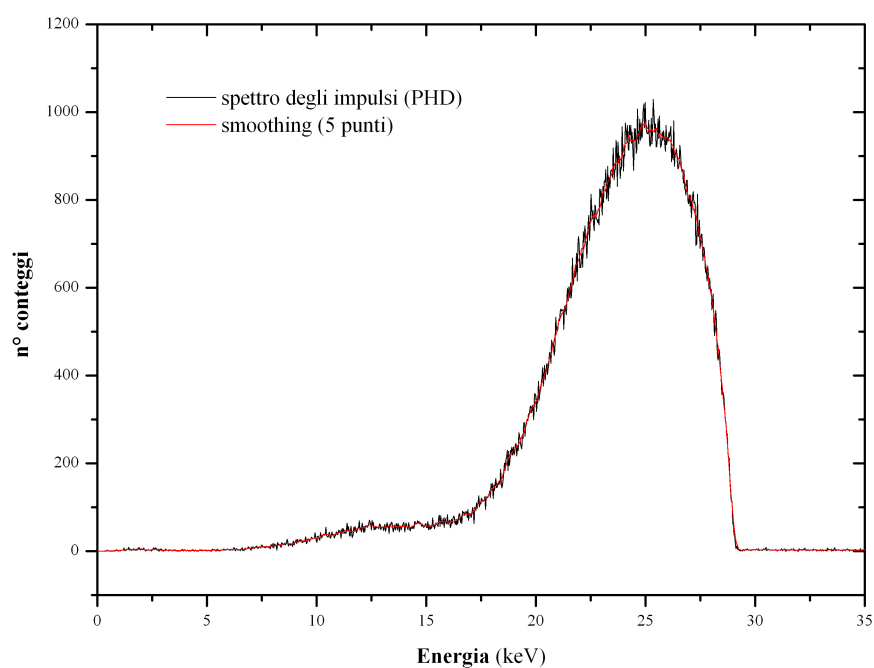


(a) N20

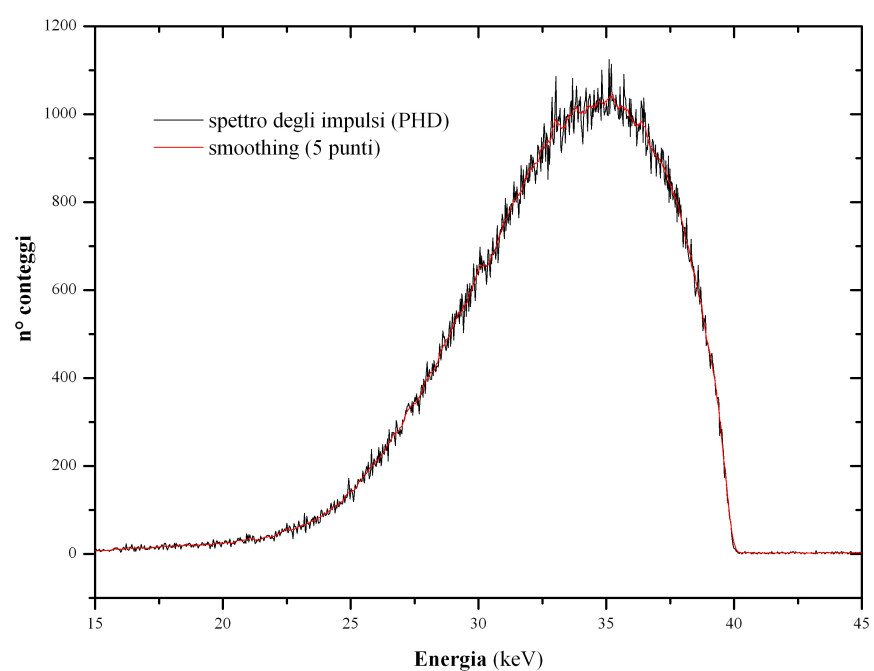


(b) N25

Figura A.11: Spettro degli impulsi (PHD = Pulse High Distribution) dei fasci N20 (a) e N25 (b) della serie "Narrow-spectrum series" (N). Distanza sorgente-rivelatore = 200 cm.



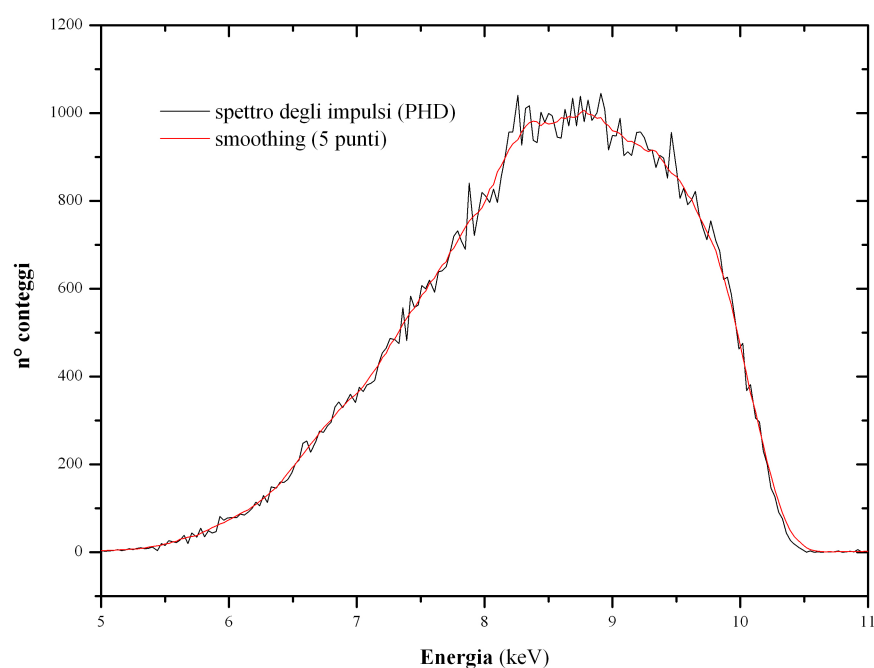
(a) N30



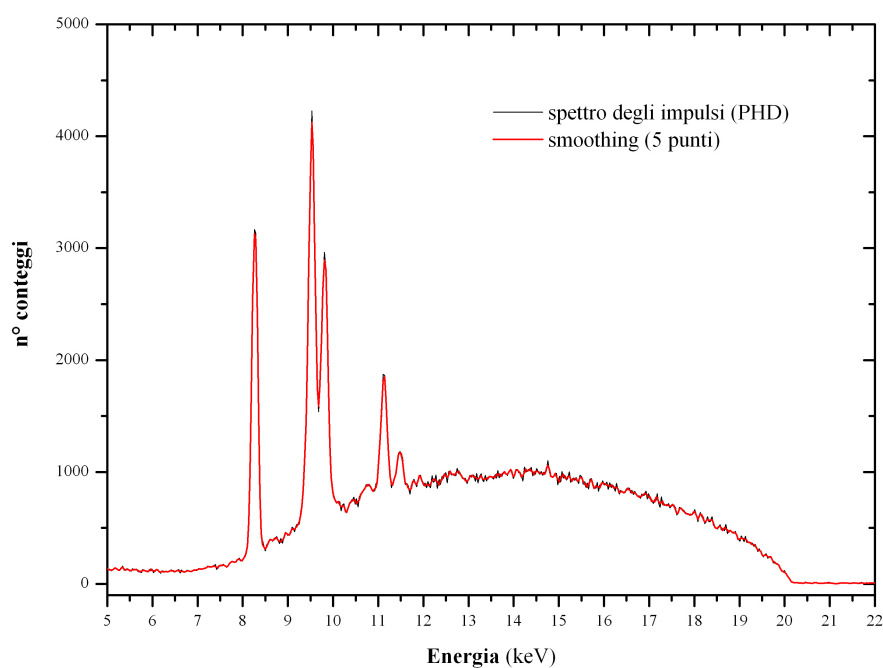
(b) N40

Figura A.12: *Spettro degli impulsi (PHD = Pulse High Distribution) dei fasci N30 e N40 della serie "Narrow-spectrum series" (N). Distanza sorgente-rivelatore = 200 cm.*

A.2.3 Serie H

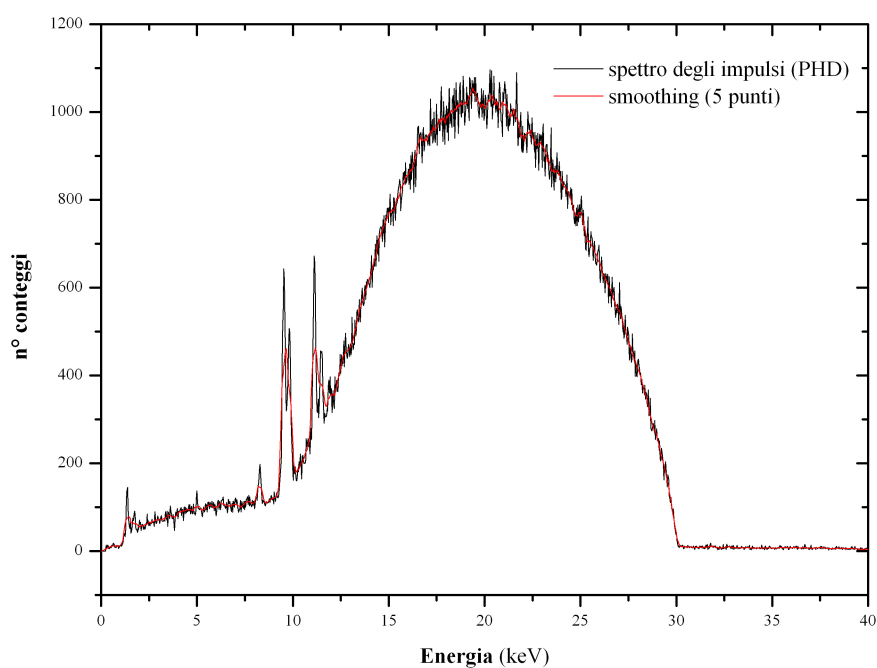


(a) H10

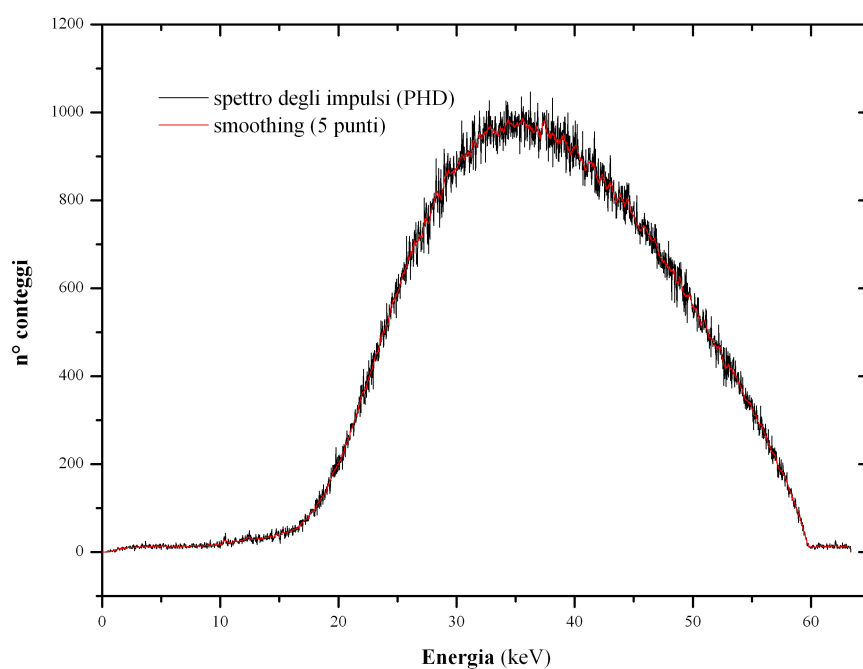


(b) H20

Figura A.13: Spettro degli impulsi (PHD = Pulse High Distribution) dei fasci H10 (a) e H20 (b) della serie "High air-kerma rate series" (H). Distanza sorgente-rivelatore = 200 cm.



(a) H30



(b) H60

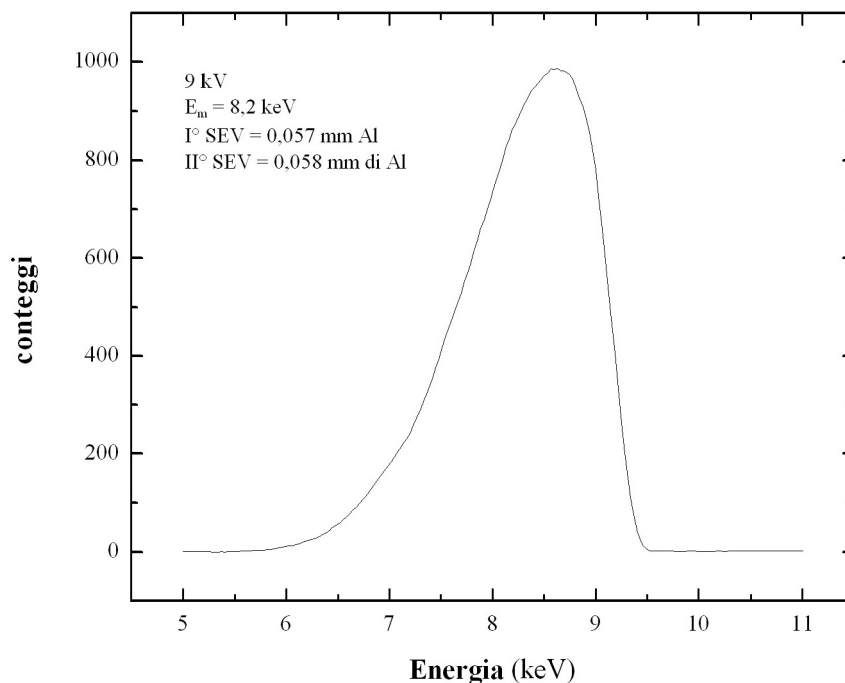
Figura A.14: *Spettro degli impulsi (PHD = Pulse High Distribution) dei fasci H30 (a) e H60 (b) della serie "High air-kerma rate series" (H). Distanza sorgente-rivelatore = 200 cm.*

Appendice B

Spettri ricostruiti

B.1 Distanza sorgente - rivelatore = 50 cm.

B.1.1 Serie L



| E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi |
|---------|----------|---------|----------|---------|----------|---------|----------|---------|----------|---------|----------|
| 5,00 | 1 | 6,09 | 15 | 7,17 | 231 | 8,26 | 893 | 9,34 | 110 | 10,42 | 2 |
| 5,03 | 1 | 6,12 | 17 | 7,20 | 241 | 8,29 | 904 | 9,37 | 76 | 10,46 | 2 |
| 5,06 | 1 | 6,15 | 20 | 7,23 | 258 | 8,32 | 918 | 9,40 | 44 | 10,49 | 2 |
| 5,09 | 1 | 6,18 | 22 | 7,26 | 273 | 8,35 | 929 | 9,43 | 26 | 10,52 | 2 |
| 5,13 | 1 | 6,21 | 23 | 7,30 | 289 | 8,38 | 943 | 9,46 | 12 | 10,55 | 2 |
| 5,16 | 1 | 6,24 | 26 | 7,33 | 306 | 8,41 | 949 | 9,50 | 5 | 10,58 | 2 |
| 5,19 | 1 | 6,27 | 28 | 7,36 | 322 | 8,44 | 957 | 9,53 | 3 | 10,61 | 2 |
| 5,22 | 1 | 6,30 | 30 | 7,39 | 339 | 8,47 | 963 | 9,56 | 2 | 10,64 | 2 |
| 5,25 | 1 | 6,33 | 34 | 7,42 | 358 | 8,50 | 971 | 9,59 | 2 | 10,67 | 2 |
| 5,28 | 1 | 6,37 | 37 | 7,45 | 375 | 8,53 | 977 | 9,62 | 2 | 10,70 | 2 |
| 5,31 | 1 | 6,40 | 42 | 7,48 | 393 | 8,57 | 986 | 9,65 | 2 | 10,73 | 2 |
| 5,34 | 1 | 6,43 | 47 | 7,51 | 417 | 8,60 | 985 | 9,68 | 2 | 10,77 | 2 |
| 5,37 | 1 | 6,46 | 51 | 7,54 | 438 | 8,63 | 987 | 9,71 | 2 | 10,80 | 2 |
| 5,40 | 1 | 6,49 | 54 | 7,57 | 456 | 8,66 | 981 | 9,74 | 2 | 10,83 | 2 |
| 5,44 | 1 | 6,52 | 59 | 7,61 | 476 | 8,69 | 982 | 9,77 | 2 | 10,86 | 2 |
| 5,47 | 1 | 6,55 | 65 | 7,64 | 497 | 8,72 | 979 | 9,81 | 2 | 10,89 | 2 |
| 5,50 | 1 | 6,58 | 71 | 7,67 | 514 | 8,75 | 974 | 9,84 | 2 | 10,92 | 2 |
| 5,53 | 2 | 6,61 | 77 | 7,70 | 532 | 8,78 | 965 | 9,87 | 2 | 10,95 | 2 |
| 5,56 | 2 | 6,64 | 84 | 7,73 | 552 | 8,81 | 946 | 9,90 | 2 | 10,98 | 2 |
| 5,59 | 2 | 6,68 | 92 | 7,76 | 570 | 8,84 | 926 | 9,93 | 2 | 11,01 | 2 |
| 5,62 | 2 | 6,71 | 99 | 7,79 | 590 | 8,88 | 908 | 9,96 | 2 | | |
| 5,65 | 3 | 6,74 | 106 | 7,82 | 616 | 8,91 | 886 | 9,99 | 1 | | |
| 5,68 | 4 | 6,77 | 113 | 7,85 | 636 | 8,94 | 857 | 10,02 | 2 | | |
| 5,71 | 4 | 6,80 | 122 | 7,88 | 660 | 8,97 | 821 | 10,05 | 2 | | |
| 5,75 | 4 | 6,83 | 131 | 7,92 | 679 | 9,00 | 779 | 10,08 | 1 | | |
| 5,78 | 4 | 6,86 | 140 | 7,95 | 701 | 9,03 | 726 | 10,12 | 1 | | |
| 5,81 | 5 | 6,89 | 148 | 7,98 | 720 | 9,06 | 671 | 10,15 | 1 | | |
| 5,84 | 6 | 6,92 | 156 | 8,01 | 740 | 9,09 | 609 | 10,18 | 2 | | |
| 5,87 | 7 | 6,95 | 166 | 8,04 | 761 | 9,12 | 540 | 10,21 | 2 | | |
| 5,90 | 8 | 6,99 | 175 | 8,07 | 781 | 9,15 | 476 | 10,24 | 1 | | |
| 5,93 | 10 | 7,02 | 184 | 8,10 | 804 | 9,19 | 405 | 10,27 | 2 | | |
| 5,96 | 11 | 7,05 | 194 | 8,13 | 828 | 9,22 | 332 | 10,30 | 2 | | |
| 5,99 | 11 | 7,08 | 205 | 8,16 | 844 | 9,25 | 264 | 10,33 | 2 | | |

Figura B.1: $L10$, distanza sorgente-rivelatore = 50 cm.

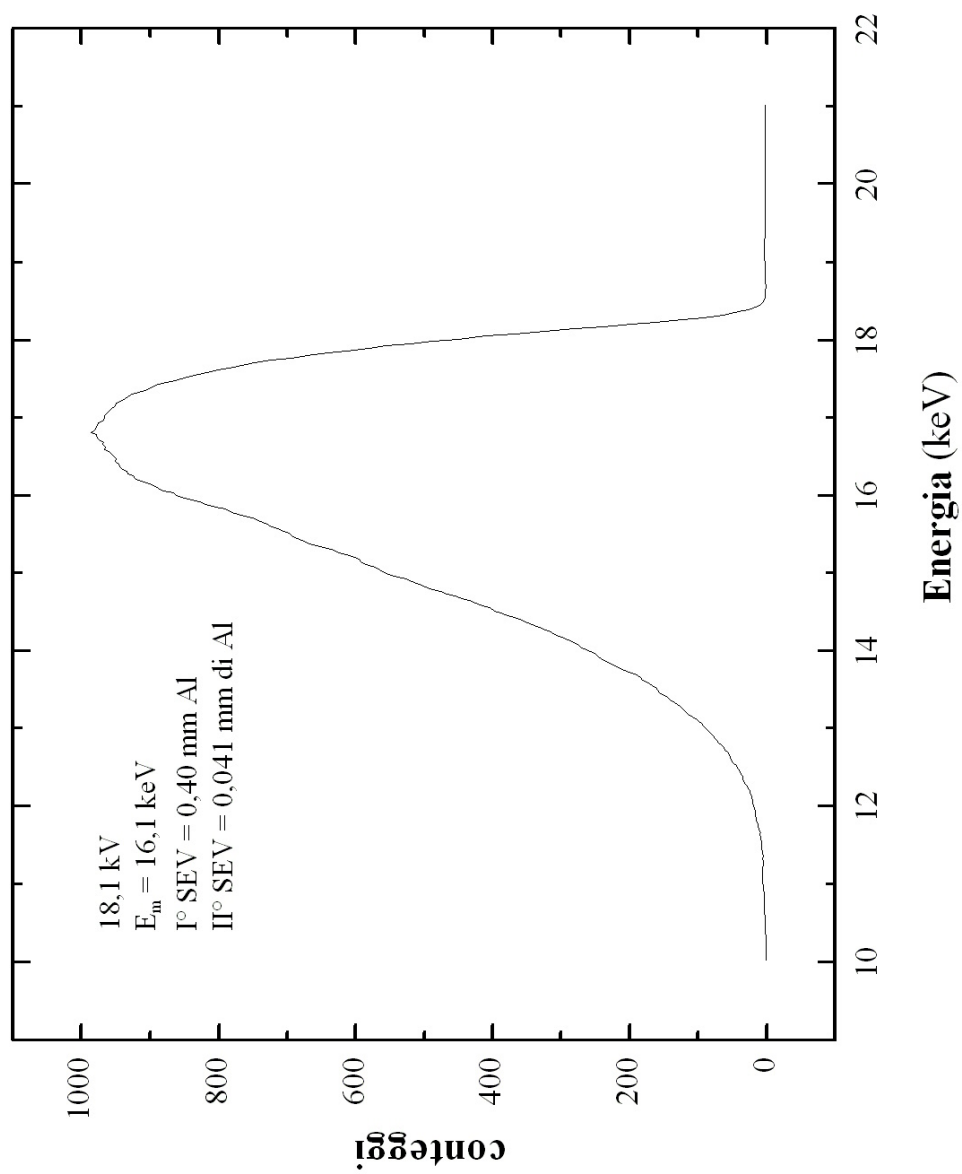
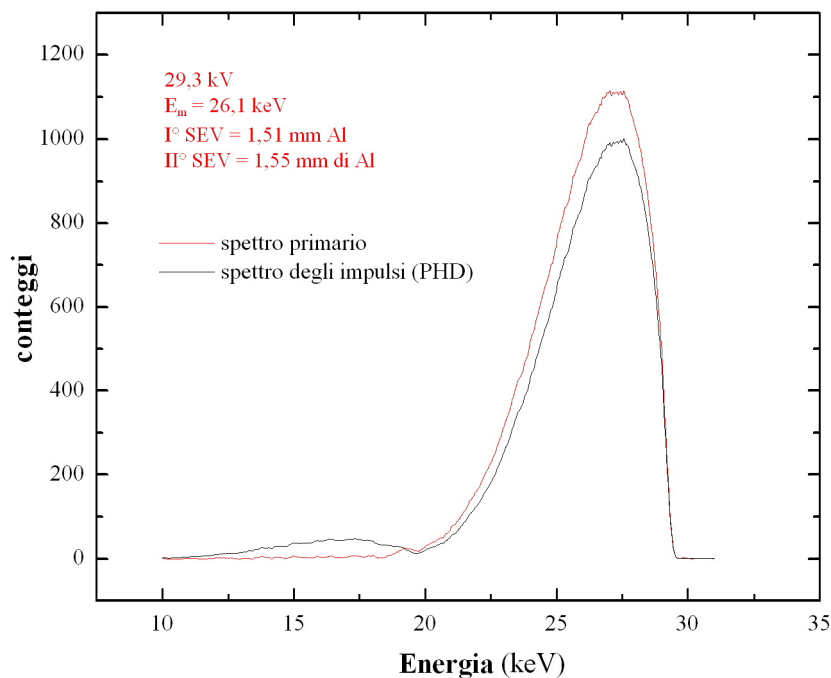


Figura B.2: *L20, distanza sorgente rivelatore = 50 cm.*

| E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi |
|---------|----------|---------|----------|---------|----------|---------|----------|---------|----------|---------|----------|---------|----------|
| 10,02 | 1 | 11,42 | 7 | 12,81 | 70 | 14,20 | 310 | 15,60 | 726 | 16,99 | 966 | 18,39 | 27 |
| 10,05 | 1 | 11,45 | 7 | 12,84 | 72 | 14,24 | 315 | 15,63 | 729 | 17,02 | 967 | 18,42 | 17 |
| 10,08 | 1 | 11,48 | 8 | 12,87 | 75 | 14,27 | 323 | 15,66 | 739 | 17,05 | 964 | 18,45 | 10 |
| 10,12 | 1 | 11,51 | 8 | 12,90 | 78 | 14,30 | 332 | 15,69 | 748 | 17,09 | 958 | 18,48 | 7 |
| 10,15 | 1 | 11,54 | 8 | 12,93 | 81 | 14,33 | 342 | 15,72 | 756 | 17,12 | 955 | 18,51 | 5 |
| 10,18 | 1 | 11,57 | 10 | 12,97 | 85 | 14,36 | 348 | 15,75 | 773 | 17,15 | 950 | 18,54 | 3 |
| 10,21 | 1 | 11,60 | 10 | 13,00 | 89 | 14,39 | 357 | 15,78 | 781 | 17,18 | 949 | 18,57 | 3 |
| 10,24 | 2 | 11,63 | 10 | 13,03 | 92 | 14,42 | 368 | 15,82 | 791 | 17,21 | 942 | 18,60 | 2 |
| 10,27 | 2 | 11,66 | 10 | 13,06 | 94 | 14,45 | 377 | 15,85 | 805 | 17,24 | 936 | 18,63 | 2 |
| 10,30 | 2 | 11,70 | 11 | 13,09 | 98 | 14,48 | 389 | 15,88 | 819 | 17,27 | 931 | 18,67 | 2 |
| 10,33 | 2 | 11,73 | 13 | 13,12 | 103 | 14,51 | 398 | 15,91 | 828 | 17,30 | 926 | 18,70 | 2 |
| 10,36 | 2 | 11,76 | 13 | 13,15 | 108 | 14,55 | 404 | 15,94 | 838 | 17,33 | 917 | 18,73 | 2 |
| 10,39 | 2 | 11,79 | 14 | 13,18 | 114 | 14,58 | 415 | 15,97 | 855 | 17,36 | 903 | 18,76 | 2 |
| 10,42 | 2 | 11,82 | 15 | 13,21 | 118 | 14,61 | 425 | 16,00 | 863 | 17,40 | 895 | 18,79 | 2 |
| 10,46 | 2 | 11,85 | 16 | 13,24 | 121 | 14,64 | 434 | 16,03 | 867 | 17,43 | 888 | 18,82 | 2 |
| 10,49 | 3 | 11,88 | 17 | 13,28 | 125 | 14,67 | 444 | 16,06 | 881 | 17,46 | 871 | 18,85 | 2 |
| 10,52 | 3 | 11,91 | 17 | 13,31 | 130 | 14,70 | 455 | 16,09 | 888 | 17,49 | 860 | 18,88 | 2 |
| 10,55 | 3 | 11,94 | 18 | 13,34 | 135 | 14,73 | 467 | 16,13 | 897 | 17,52 | 847 | 18,91 | 3 |
| 10,58 | 3 | 11,97 | 19 | 13,37 | 141 | 14,76 | 476 | 16,16 | 904 | 17,55 | 836 | 18,94 | 3 |
| 10,61 | 4 | 12,01 | 20 | 13,40 | 144 | 14,79 | 488 | 16,19 | 917 | 17,58 | 818 | 18,97 | 3 |
| 10,64 | 4 | 12,04 | 21 | 13,43 | 150 | 14,82 | 498 | 16,22 | 921 | 17,61 | 802 | 19,01 | 3 |
| 10,67 | 4 | 12,07 | 21 | 13,46 | 156 | 14,86 | 507 | 16,25 | 924 | 17,64 | 785 | 19,04 | 4 |
| 10,70 | 4 | 12,10 | 22 | 13,49 | 158 | 14,89 | 518 | 16,28 | 932 | 17,67 | 768 | 19,07 | 4 |
| 10,73 | 4 | 12,13 | 23 | 13,52 | 162 | 14,92 | 525 | 16,31 | 934 | 17,71 | 748 | 19,10 | 4 |
| 10,77 | 4 | 12,16 | 25 | 13,55 | 167 | 14,95 | 539 | 16,34 | 941 | 17,74 | 724 | 19,13 | 4 |
| 10,80 | 4 | 12,19 | 25 | 13,59 | 175 | 14,98 | 551 | 16,37 | 944 | 17,77 | 695 | 19,16 | 4 |
| 10,83 | 4 | 12,22 | 28 | 13,62 | 181 | 15,01 | 559 | 16,40 | 945 | 17,80 | 671 | 19,19 | 4 |
| 10,86 | 4 | 12,25 | 30 | 13,65 | 184 | 15,04 | 565 | 16,44 | 950 | 17,83 | 640 | 19,22 | 4 |
| 10,89 | 5 | 12,28 | 32 | 13,68 | 189 | 15,07 | 571 | 16,47 | 949 | 17,86 | 614 | 19,25 | 4 |
| 10,92 | 5 | 12,31 | 34 | 13,71 | 196 | 15,10 | 581 | 16,50 | 953 | 17,89 | 580 | 19,28 | 4 |
| 10,95 | 6 | 12,35 | 35 | 13,74 | 208 | 15,13 | 591 | 16,53 | 955 | 17,92 | 556 | 19,32 | 3 |
| 10,98 | 6 | 12,38 | 36 | 13,77 | 214 | 15,17 | 596 | 16,56 | 959 | 17,95 | 520 | 19,35 | 3 |
| 11,01 | 7 | 12,41 | 38 | 13,80 | 220 | 15,20 | 602 | 16,59 | 966 | 17,98 | 488 | 19,38 | 3 |
| 11,04 | 7 | 12,44 | 40 | 13,83 | 227 | 15,23 | 613 | 16,62 | 965 | 18,01 | 450 | 19,41 | 3 |
| 11,08 | 7 | 12,47 | 41 | 13,86 | 234 | 15,26 | 625 | 16,65 | 968 | 18,05 | 411 | 19,44 | 2 |
| 11,11 | 7 | 12,50 | 43 | 13,89 | 241 | 15,29 | 632 | 16,68 | 968 | 18,08 | 367 | 19,47 | 2 |
| 11,14 | 7 | 12,53 | 46 | 13,93 | 246 | 15,32 | 641 | 16,71 | 974 | 18,11 | 323 | 19,50 | 2 |
| 11,17 | 7 | 12,56 | 49 | 13,96 | 251 | 15,35 | 658 | 16,74 | 976 | 18,14 | 281 | 19,53 | 2 |
| 11,20 | 7 | 12,59 | 51 | 13,99 | 258 | 15,38 | 671 | 16,78 | 978 | 18,17 | 239 | 19,56 | 2 |
| 11,23 | 6 | 12,62 | 53 | 14,02 | 266 | 15,41 | 675 | 16,81 | 985 | 18,20 | 197 | 19,59 | 2 |
| 11,26 | 6 | 12,66 | 54 | 14,05 | 272 | 15,44 | 686 | 16,84 | 980 | 18,23 | 161 | 19,63 | 2 |
| 11,29 | 6 | 12,69 | 57 | 14,08 | 275 | 15,47 | 692 | 16,87 | 978 | 18,26 | 123 | 19,66 | 2 |
| 11,32 | 6 | 12,72 | 60 | 14,11 | 284 | 15,51 | 697 | 16,90 | 976 | 18,29 | 91 | 19,69 | 2 |
| 11,35 | 6 | 12,75 | 62 | 14,14 | 289 | 15,54 | 706 | 16,93 | 975 | 18,32 | 63 | 19,72 | 2 |
| 11,39 | 6 | 12,78 | 66 | 14,17 | 299 | 15,57 | 714 | 16,96 | 969 | 18,36 | 42 | 19,75 | 3 |



| E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi |
|---------|----------|---------|----------|---------|----------|---------|----------|---------|----------|---------|----------|---------|----------|---------|----------|
| 17,02 | 5 | 18,88 | 14 | 20,74 | 55 | 22,60 | 241 | 24,46 | 624 | 26,31 | 1040 | 28,17 | 982 | 30,03 | 2 |
| 17,05 | 5 | 18,91 | 16 | 20,77 | 58 | 22,63 | 244 | 24,49 | 633 | 26,35 | 1046 | 28,20 | 974 | 30,06 | 1 |
| 17,09 | 6 | 18,94 | 16 | 20,80 | 61 | 22,66 | 251 | 24,52 | 639 | 26,38 | 1050 | 28,23 | 966 | 30,09 | 1 |
| 17,12 | 6 | 18,97 | 18 | 20,83 | 61 | 22,69 | 257 | 24,55 | 647 | 26,41 | 1051 | 28,26 | 952 | 30,12 | 1 |
| 17,15 | 6 | 19,01 | 19 | 20,86 | 63 | 22,72 | 262 | 24,58 | 650 | 26,44 | 1054 | 28,30 | 941 | 30,15 | 1 |
| 17,18 | 7 | 19,04 | 20 | 20,90 | 65 | 22,75 | 269 | 24,61 | 658 | 26,47 | 1061 | 28,33 | 929 | 30,18 | 1 |
| 17,21 | 7 | 19,07 | 22 | 20,93 | 68 | 22,78 | 274 | 24,64 | 664 | 26,50 | 1063 | 28,36 | 916 | 30,21 | 1 |
| 17,24 | 8 | 19,10 | 22 | 20,96 | 70 | 22,82 | 280 | 24,67 | 669 | 26,53 | 1063 | 28,39 | 904 | 30,25 | 1 |
| 17,27 | 7 | 19,13 | 23 | 20,99 | 74 | 22,85 | 284 | 24,70 | 671 | 26,56 | 1063 | 28,42 | 884 | 30,28 | 1 |
| 17,30 | 8 | 19,16 | 24 | 21,02 | 76 | 22,88 | 291 | 24,73 | 680 | 26,59 | 1069 | 28,45 | 874 | 30,31 | 1 |
| 17,33 | 8 | 19,19 | 25 | 21,05 | 78 | 22,91 | 295 | 24,77 | 693 | 26,62 | 1078 | 28,48 | 863 | 30,34 | 1 |
| 17,36 | 8 | 19,22 | 26 | 21,08 | 79 | 22,94 | 305 | 24,80 | 701 | 26,65 | 1082 | 28,51 | 849 | 30,37 | 2 |
| 17,40 | 7 | 19,25 | 25 | 21,11 | 80 | 22,97 | 310 | 24,83 | 704 | 26,69 | 1080 | 28,54 | 832 | 30,40 | 1 |
| 17,43 | 6 | 19,28 | 26 | 21,14 | 81 | 23,00 | 315 | 24,86 | 712 | 26,72 | 1090 | 28,57 | 810 | 30,43 | 2 |
| 17,46 | 6 | 19,32 | 25 | 21,17 | 84 | 23,03 | 321 | 24,89 | 716 | 26,75 | 1098 | 28,61 | 789 | 30,46 | 2 |
| 17,49 | 7 | 19,35 | 25 | 21,20 | 88 | 23,06 | 329 | 24,92 | 728 | 26,78 | 1099 | 28,64 | 776 | 30,49 | 2 |
| 17,52 | 6 | 19,38 | 25 | 21,24 | 89 | 23,09 | 329 | 24,95 | 734 | 26,81 | 1097 | 28,67 | 761 | 30,52 | 1 |
| 17,55 | 6 | 19,41 | 24 | 21,27 | 91 | 23,12 | 334 | 24,98 | 743 | 26,84 | 1101 | 28,70 | 746 | 30,56 | 1 |
| 17,58 | 5 | 19,44 | 24 | 21,30 | 95 | 23,16 | 341 | 25,01 | 754 | 26,87 | 1099 | 28,73 | 719 | 30,59 | 2 |
| 17,61 | 5 | 19,47 | 24 | 21,33 | 95 | 23,19 | 347 | 25,04 | 773 | 26,90 | 1104 | 28,76 | 702 | 30,62 | 1 |
| 17,64 | 5 | 19,50 | 22 | 21,36 | 100 | 23,22 | 355 | 25,08 | 778 | 26,93 | 1110 | 28,79 | 678 | 30,65 | 1 |
| 17,67 | 5 | 19,53 | 21 | 21,39 | 103 | 23,25 | 363 | 25,11 | 783 | 26,96 | 1111 | 28,82 | 655 | 30,68 | 1 |
| 17,71 | 5 | 19,56 | 20 | 21,42 | 106 | 23,28 | 367 | 25,14 | 790 | 27,00 | 1108 | 28,85 | 633 | 30,71 | 1 |
| 17,74 | 6 | 19,59 | 21 | 21,45 | 108 | 23,31 | 377 | 25,17 | 799 | 27,03 | 1114 | 28,88 | 608 | 30,74 | 1 |
| 17,77 | 6 | 19,63 | 20 | 21,48 | 112 | 23,34 | 381 | 25,20 | 805 | 27,06 | 1107 | 28,91 | 585 | 30,77 | 1 |
| 17,80 | 7 | 19,66 | 19 | 21,51 | 116 | 23,37 | 390 | 25,23 | 813 | 27,09 | 1103 | 28,95 | 562 | 30,80 | 1 |
| 17,83 | 7 | 19,69 | 19 | 21,55 | 116 | 23,40 | 396 | 25,26 | 817 | 27,12 | 1105 | 28,98 | 527 | 30,83 | 1 |
| 17,86 | 8 | 19,72 | 19 | 21,58 | 121 | 23,43 | 403 | 25,29 | 825 | 27,15 | 1110 | 29,01 | 495 | 30,86 | 1 |
| 17,89 | 7 | 19,75 | 19 | 21,61 | 125 | 23,47 | 411 | 25,32 | 836 | 27,18 | 1111 | 29,04 | 456 | 30,90 | 1 |
| 17,92 | 6 | 19,78 | 21 | 21,64 | 129 | 23,50 | 417 | 25,35 | 836 | 27,21 | 1108 | 29,07 | 422 | 30,93 | 1 |

Figura B.3: $L30$, distanza sorgente-rivelatore = 50 cm.

(segue) L30, distanza sorgente-rivelatore = 50 cm.

| E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi |
|---------|----------|---------|----------|---------|----------|---------|----------|---------|----------|---------|----------|---------|----------|
| 17,95 | 7 | 19,81 | 21 | 21,67 | 133 | 23,53 | 425 | 25,39 | 842 | 27,24 | 1108 | 29,10 | 384 |
| 17,98 | 6 | 19,84 | 22 | 21,70 | 137 | 23,56 | 426 | 25,42 | 845 | 27,27 | 1109 | 29,13 | 346 |
| 18,01 | 10 | 19,87 | 24 | 21,73 | 140 | 23,59 | 430 | 25,45 | 854 | 27,30 | 1111 | 29,16 | 307 |
| 18,05 | 8 | 19,90 | 25 | 21,76 | 140 | 23,62 | 433 | 25,48 | 855 | 27,34 | 1110 | 29,19 | 268 |
| 18,08 | 6 | 19,94 | 25 | 21,79 | 144 | 23,65 | 437 | 25,51 | 863 | 27,37 | 1103 | 29,22 | 226 |
| 18,11 | 4 | 19,97 | 27 | 21,82 | 147 | 23,68 | 444 | 25,54 | 875 | 27,40 | 1110 | 29,26 | 189 |
| 18,14 | 4 | 20,00 | 30 | 21,86 | 150 | 23,71 | 446 | 25,57 | 885 | 27,43 | 1111 | 29,29 | 151 |
| 18,17 | 4 | 20,03 | 32 | 21,89 | 155 | 23,74 | 451 | 25,60 | 899 | 27,46 | 1113 | 29,32 | 122 |
| 18,20 | 1 | 20,06 | 33 | 21,92 | 158 | 23,78 | 465 | 25,63 | 911 | 27,49 | 1106 | 29,35 | 93 |
| 18,23 | 2 | 20,09 | 34 | 21,95 | 160 | 23,81 | 472 | 25,66 | 913 | 27,52 | 1106 | 29,38 | 70 |
| 18,26 | 4 | 20,12 | 33 | 21,98 | 163 | 23,84 | 475 | 25,69 | 918 | 27,55 | 1114 | 29,41 | 50 |
| 18,29 | 3 | 20,15 | 35 | 22,01 | 165 | 23,87 | 479 | 25,73 | 921 | 27,58 | 1113 | 29,44 | 36 |
| 18,32 | 3 | 20,18 | 36 | 22,04 | 167 | 23,90 | 487 | 25,76 | 931 | 27,61 | 1106 | 29,47 | 22 |
| 18,36 | 2 | 20,21 | 37 | 22,07 | 172 | 23,93 | 496 | 25,79 | 935 | 27,65 | 1096 | 29,50 | 13 |
| 18,39 | 3 | 20,24 | 38 | 22,10 | 177 | 23,96 | 503 | 25,82 | 942 | 27,68 | 1097 | 29,53 | 7 |
| 18,42 | 4 | 20,28 | 39 | 22,13 | 180 | 23,99 | 512 | 25,85 | 944 | 27,71 | 1095 | 29,56 | 5 |
| 18,45 | 5 | 20,31 | 41 | 22,16 | 183 | 24,02 | 522 | 25,88 | 950 | 27,74 | 1089 | 29,60 | 3 |
| 18,48 | 5 | 20,34 | 40 | 22,20 | 192 | 24,05 | 532 | 25,91 | 951 | 27,77 | 1078 | 29,63 | 2 |
| 18,51 | 5 | 20,37 | 41 | 22,23 | 194 | 24,08 | 536 | 25,94 | 958 | 27,80 | 1069 | 29,66 | 1 |
| 18,54 | 7 | 20,40 | 43 | 22,26 | 198 | 24,12 | 539 | 25,97 | 963 | 27,83 | 1066 | 29,69 | 2 |
| 18,57 | 8 | 20,43 | 45 | 22,29 | 203 | 24,15 | 548 | 26,00 | 974 | 27,86 | 1057 | 29,72 | 2 |
| 18,60 | 8 | 20,46 | 46 | 22,32 | 206 | 24,18 | 555 | 26,04 | 983 | 27,89 | 1051 | 29,75 | 2 |
| 18,63 | 9 | 20,49 | 47 | 22,35 | 209 | 24,21 | 564 | 26,07 | 996 | 27,92 | 1045 | 29,78 | 2 |
| 18,67 | 9 | 20,52 | 48 | 22,38 | 211 | 24,24 | 572 | 26,10 | 1002 | 27,95 | 1038 | 29,81 | 2 |
| 18,70 | 10 | 20,55 | 48 | 22,41 | 215 | 24,27 | 577 | 26,13 | 1006 | 27,99 | 1031 | 29,84 | 3 |
| 18,73 | 10 | 20,59 | 50 | 22,44 | 221 | 24,30 | 586 | 26,16 | 1016 | 28,02 | 1022 | 29,87 | 3 |
| 18,76 | 12 | 20,62 | 51 | 22,47 | 226 | 24,33 | 595 | 26,19 | 1027 | 28,05 | 1021 | 29,91 | 2 |
| 18,79 | 13 | 20,65 | 50 | 22,51 | 231 | 24,36 | 597 | 26,22 | 1033 | 28,08 | 1009 | 29,94 | 2 |
| 18,82 | 12 | 20,68 | 51 | 22,54 | 233 | 24,39 | 607 | 26,25 | 1039 | 28,11 | 1005 | 29,97 | 2 |
| 18,85 | 14 | 20,71 | 53 | 22,57 | 238 | 24,43 | 616 | 26,28 | 1035 | 28,14 | 993 | 30,00 | 2 |

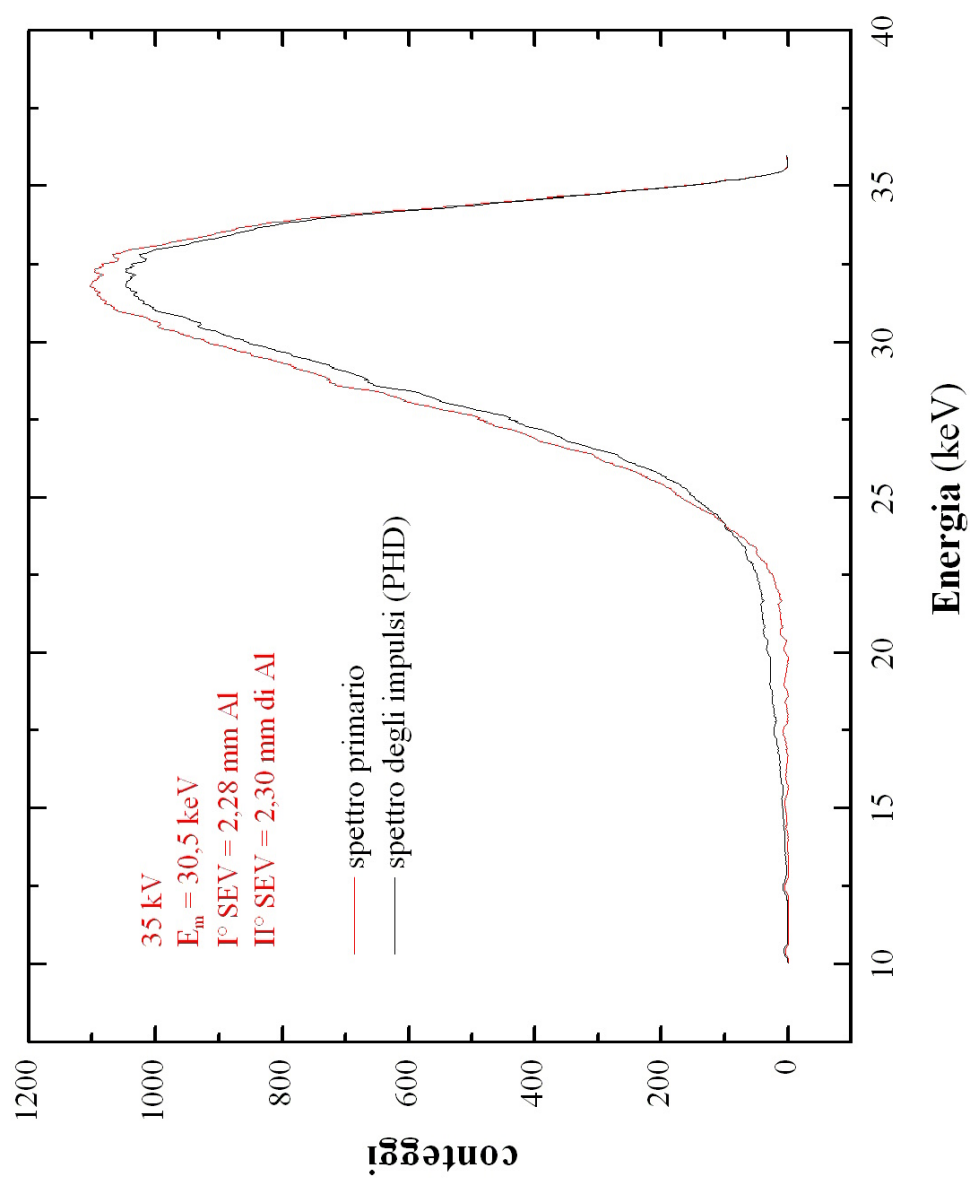


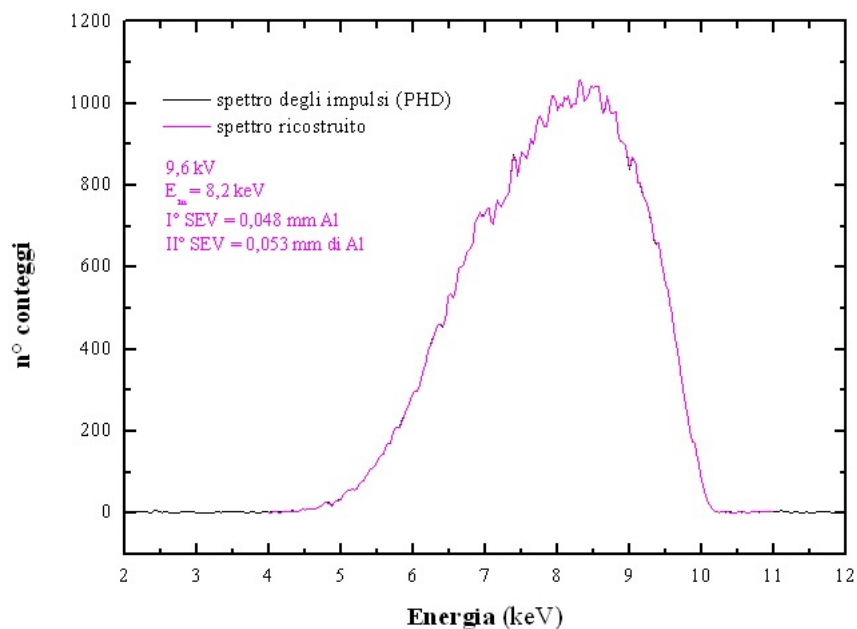
Figura B.4: *L35*, distanza sorgente rivelatore = 50 cm.

| E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi |
|------------|----------|------------|----------|------------|----------|------------|----------|------------|----------|------------|----------|------------|----------|------------|----------|
| 20,00 | 4 | 21,86 | 14 | 23,71 | 73 | 25,57 | 219 | 27,43 | 481 | 29,29 | 797 | 31,14 | 1070 | 33,00 | 1034 |
| 20,03 | 6 | 21,89 | 13 | 23,74 | 76 | 25,60 | 220 | 27,46 | 476 | 29,32 | 801 | 31,17 | 1069 | 33,03 | 1020 |
| 20,06 | 7 | 21,92 | 16 | 23,78 | 78 | 25,63 | 224 | 27,49 | 484 | 29,35 | 806 | 31,21 | 1074 | 33,06 | 1015 |
| 20,09 | 7 | 21,95 | 17 | 23,81 | 78 | 25,66 | 222 | 27,52 | 491 | 29,38 | 811 | 31,24 | 1080 | 33,09 | 1004 |
| 20,12 | 8 | 21,98 | 16 | 23,84 | 80 | 25,69 | 230 | 27,55 | 488 | 29,41 | 819 | 31,27 | 1079 | 33,12 | 993 |
| 20,15 | 7 | 22,01 | 18 | 23,87 | 82 | 25,73 | 231 | 27,58 | 495 | 29,44 | 818 | 31,30 | 1078 | 33,16 | 980 |
| 20,18 | 6 | 22,04 | 19 | 23,90 | 83 | 25,76 | 237 | 27,61 | 496 | 29,47 | 827 | 31,33 | 1078 | 33,19 | 979 |
| 20,21 | 5 | 22,07 | 19 | 23,93 | 88 | 25,79 | 238 | 27,65 | 502 | 29,50 | 834 | 31,36 | 1086 | 33,22 | 971 |
| 20,24 | 4 | 22,10 | 20 | 23,96 | 90 | 25,82 | 241 | 27,68 | 513 | 29,53 | 842 | 31,39 | 1086 | 33,25 | 962 |
| 20,28 | 4 | 22,13 | 19 | 23,99 | 95 | 25,85 | 248 | 27,71 | 519 | 29,56 | 849 | 31,42 | 1087 | 33,28 | 958 |
| 20,31 | 5 | 22,16 | 20 | 24,02 | 94 | 25,88 | 249 | 27,74 | 524 | 29,60 | 848 | 31,45 | 1087 | 33,31 | 945 |
| 20,34 | 4 | 22,20 | 21 | 24,05 | 97 | 25,91 | 254 | 27,77 | 531 | 29,63 | 851 | 31,48 | 1092 | 33,34 | 936 |
| 20,37 | 3 | 22,23 | 21 | 24,08 | 98 | 25,94 | 258 | 27,80 | 542 | 29,66 | 863 | 31,51 | 1091 | 33,37 | 932 |
| 20,40 | 3 | 22,26 | 19 | 24,12 | 97 | 25,97 | 261 | 27,83 | 548 | 29,69 | 869 | 31,55 | 1091 | 33,40 | 922 |
| 20,43 | 5 | 22,29 | 22 | 24,15 | 99 | 26,00 | 271 | 27,86 | 553 | 29,72 | 876 | 31,58 | 1087 | 33,43 | 915 |
| 20,46 | 7 | 22,32 | 23 | 24,18 | 101 | 26,04 | 273 | 27,89 | 561 | 29,75 | 875 | 31,61 | 1088 | 33,46 | 910 |
| 20,49 | 9 | 22,35 | 23 | 24,21 | 103 | 26,07 | 277 | 27,92 | 564 | 29,78 | 885 | 31,64 | 1094 | 33,50 | 903 |
| 20,52 | 10 | 22,38 | 22 | 24,24 | 105 | 26,10 | 277 | 27,95 | 579 | 29,81 | 887 | 31,67 | 1096 | 33,53 | 893 |
| 20,55 | 11 | 22,41 | 22 | 24,27 | 108 | 26,13 | 286 | 27,99 | 588 | 29,84 | 891 | 31,70 | 1096 | 33,56 | 886 |
| 20,59 | 12 | 22,44 | 24 | 24,30 | 111 | 26,16 | 291 | 28,02 | 594 | 29,87 | 897 | 31,73 | 1095 | 33,59 | 878 |
| 20,62 | 13 | 22,47 | 24 | 24,33 | 110 | 26,19 | 293 | 28,05 | 598 | 29,91 | 905 | 31,76 | 1100 | 33,62 | 873 |
| 20,65 | 12 | 22,51 | 26 | 24,36 | 115 | 26,22 | 297 | 28,08 | 607 | 29,94 | 914 | 31,79 | 1103 | 33,65 | 872 |
| 20,68 | 13 | 22,54 | 26 | 24,39 | 115 | 26,25 | 300 | 28,11 | 605 | 29,97 | 918 | 31,82 | 1103 | 33,68 | 866 |
| 20,71 | 13 | 22,57 | 28 | 24,43 | 117 | 26,28 | 305 | 28,14 | 609 | 30,00 | 917 | 31,86 | 1101 | 33,71 | 855 |
| 20,74 | 13 | 22,60 | 31 | 24,46 | 122 | 26,31 | 306 | 28,17 | 612 | 30,03 | 923 | 31,89 | 1100 | 33,74 | 842 |
| 20,77 | 11 | 22,63 | 29 | 24,49 | 125 | 26,35 | 307 | 28,20 | 615 | 30,06 | 925 | 31,92 | 1099 | 33,77 | 836 |
| 20,80 | 9 | 22,66 | 31 | 24,52 | 128 | 26,38 | 308 | 28,23 | 621 | 30,09 | 935 | 31,95 | 1099 | 33,81 | 829 |
| 20,83 | 10 | 22,69 | 33 | 24,55 | 131 | 26,41 | 313 | 28,26 | 626 | 30,12 | 938 | 31,98 | 1095 | 33,84 | 813 |
| 20,86 | 9 | 22,72 | 34 | 24,58 | 134 | 26,44 | 320 | 28,30 | 633 | 30,15 | 944 | 32,01 | 1092 | 33,87 | 804 |
| 20,90 | 11 | 22,75 | 34 | 24,61 | 138 | 26,47 | 326 | 28,33 | 637 | 30,18 | 948 | 32,04 | 1092 | 33,90 | 793 |
| 20,93 | 12 | 22,78 | 34 | 24,64 | 137 | 26,50 | 332 | 28,36 | 640 | 30,21 | 957 | 32,07 | 1089 | 33,93 | 782 |
| 20,96 | 11 | 22,82 | 35 | 24,67 | 142 | 26,53 | 341 | 28,39 | 651 | 30,25 | 957 | 32,10 | 1090 | 33,96 | 767 |
| 20,99 | 11 | 22,85 | 35 | 24,70 | 144 | 26,56 | 348 | 28,42 | 656 | 30,28 | 963 | 32,13 | 1087 | 33,99 | 747 |

(segue)L35, distanza sorgente-rivelatore = 50 cm.

| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-------|----|-------|----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|------|-------|------|-------|-----|-------|---|
| 21,02 | 12 | 22,88 | 37 | 24,73 | 146 | 26,59 | 351 | 28,45 | 668 | 30,31 | 963 | 32,16 | 1082 | 34,02 | 732 | 35,88 | 2 |
| 21,05 | 11 | 22,91 | 38 | 24,77 | 150 | 26,62 | 356 | 28,48 | 681 | 30,34 | 966 | 32,20 | 1091 | 34,05 | 715 | 35,91 | 2 |
| 21,08 | 12 | 22,94 | 39 | 24,80 | 152 | 26,65 | 364 | 28,51 | 690 | 30,37 | 971 | 32,23 | 1097 | 34,08 | 702 | 35,94 | 3 |
| 21,11 | 13 | 22,97 | 42 | 24,83 | 154 | 26,69 | 371 | 28,54 | 700 | 30,40 | 983 | 32,26 | 1096 | 34,11 | 685 | 35,97 | 3 |
| 21,14 | 12 | 23,00 | 44 | 24,86 | 158 | 26,72 | 376 | 28,57 | 710 | 30,43 | 988 | 32,29 | 1095 | 34,15 | 664 | 36,00 | 3 |
| 21,17 | 13 | 23,03 | 44 | 24,89 | 159 | 26,75 | 383 | 28,61 | 717 | 30,46 | 992 | 32,32 | 1096 | 34,18 | 653 | | |
| 21,20 | 12 | 23,06 | 45 | 24,92 | 164 | 26,78 | 391 | 28,64 | 716 | 30,49 | 995 | 32,35 | 1095 | 34,21 | 635 | | |
| 21,24 | 12 | 23,09 | 47 | 24,95 | 166 | 26,81 | 393 | 28,67 | 717 | 30,52 | 997 | 32,38 | 1087 | 34,24 | 615 | | |
| 21,27 | 12 | 23,12 | 48 | 24,98 | 168 | 26,84 | 397 | 28,70 | 726 | 30,56 | 991 | 32,41 | 1087 | 34,27 | 590 | | |
| 21,30 | 13 | 23,16 | 50 | 25,01 | 169 | 26,87 | 398 | 28,73 | 724 | 30,59 | 992 | 32,44 | 1081 | 34,30 | 570 | | |
| 21,33 | 15 | 23,19 | 51 | 25,04 | 173 | 26,90 | 402 | 28,76 | 725 | 30,62 | 992 | 32,47 | 1083 | 34,33 | 550 | | |
| 21,36 | 14 | 23,22 | 50 | 25,08 | 177 | 26,93 | 403 | 28,79 | 730 | 30,65 | 1000 | 32,51 | 1084 | 34,36 | 536 | | |
| 21,39 | 13 | 23,25 | 51 | 25,11 | 178 | 26,96 | 407 | 28,82 | 726 | 30,68 | 1005 | 32,54 | 1079 | 34,39 | 519 | | |
| 21,42 | 14 | 23,28 | 50 | 25,14 | 176 | 27,00 | 412 | 28,85 | 731 | 30,71 | 1009 | 32,57 | 1069 | 34,42 | 502 | | |
| 21,45 | 15 | 23,31 | 50 | 25,17 | 179 | 27,03 | 416 | 28,88 | 734 | 30,74 | 1009 | 32,60 | 1062 | 34,46 | 481 | | |
| 21,48 | 15 | 23,34 | 52 | 25,20 | 182 | 27,06 | 422 | 28,91 | 742 | 30,77 | 1014 | 32,63 | 1060 | 34,49 | 462 | | |
| 21,51 | 15 | 23,37 | 52 | 25,23 | 184 | 27,09 | 424 | 28,95 | 744 | 30,80 | 1015 | 32,66 | 1058 | 34,52 | 439 | | |
| 21,55 | 16 | 23,40 | 52 | 25,26 | 184 | 27,12 | 431 | 28,98 | 747 | 30,83 | 1022 | 32,69 | 1063 | 34,55 | 423 | | |
| 21,58 | 14 | 23,43 | 55 | 25,29 | 185 | 27,15 | 434 | 29,01 | 754 | 30,86 | 1029 | 32,72 | 1064 | 34,58 | 406 | | |
| 21,61 | 13 | 23,47 | 59 | 25,32 | 190 | 27,18 | 437 | 29,04 | 756 | 30,90 | 1041 | 32,75 | 1067 | 34,61 | 391 | | |
| 21,64 | 12 | 23,50 | 61 | 25,35 | 193 | 27,21 | 449 | 29,07 | 763 | 30,93 | 1050 | 32,78 | 1066 | 34,64 | 373 | | |
| 21,67 | 10 | 23,53 | 61 | 25,39 | 196 | 27,24 | 453 | 29,10 | 771 | 30,96 | 1056 | 32,81 | 1068 | 34,67 | 358 | | |
| 21,70 | 11 | 23,56 | 64 | 25,42 | 198 | 27,27 | 462 | 29,13 | 774 | 30,99 | 1061 | 32,85 | 1057 | 34,70 | 332 | | |
| 21,73 | 14 | 23,59 | 64 | 25,45 | 201 | 27,30 | 465 | 29,16 | 783 | 31,02 | 1061 | 32,88 | 1052 | 34,73 | 312 | | |
| 21,76 | 13 | 23,62 | 67 | 25,48 | 208 | 27,34 | 465 | 29,19 | 779 | 31,05 | 1066 | 32,91 | 1051 | 34,76 | 293 | | |
| 21,79 | 14 | 23,65 | 68 | 25,51 | 209 | 27,37 | 470 | 29,22 | 785 | 31,08 | 1065 | 32,94 | 1043 | 34,80 | 273 | | |
| 21,82 | 15 | 23,68 | 69 | 25,54 | 213 | 27,40 | 476 | 29,26 | 786 | 31,11 | 1064 | 32,97 | 1042 | 34,83 | 255 | | |

B.1.2 Serie N

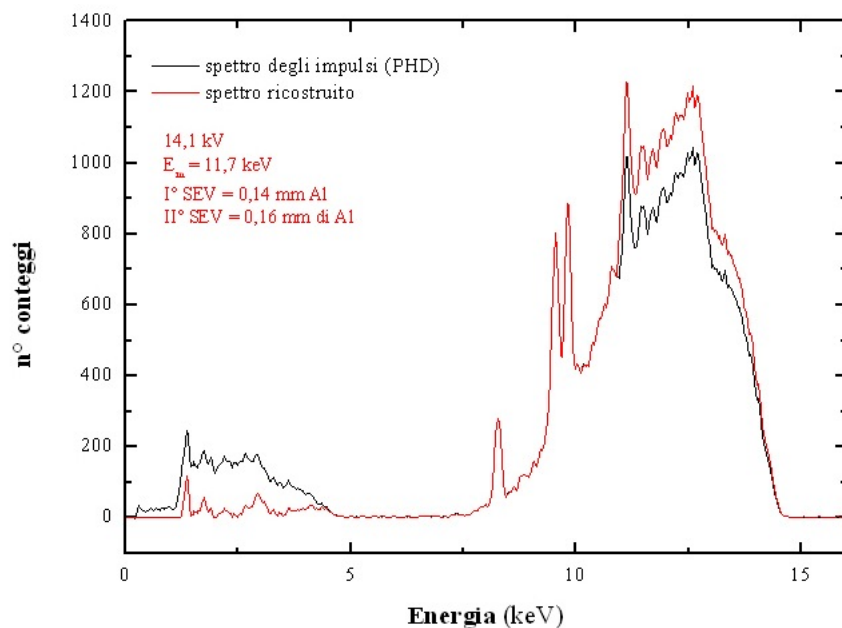


| E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi |
|---------|----------|---------|----------|---------|----------|---------|----------|
| 4,01 | 2 | 5,87 | 236 | 7,73 | 958 | 9,59 | 483 |
| 4,04 | 2 | 5,90 | 244 | 7,76 | 970 | 9,62 | 452 |
| 4,07 | 3 | 5,93 | 259 | 7,79 | 955 | 9,65 | 412 |
| 4,10 | 3 | 5,96 | 279 | 7,82 | 942 | 9,68 | 375 |
| 4,13 | 2 | 5,99 | 289 | 7,85 | 944 | 9,71 | 346 |
| 4,17 | 2 | 6,02 | 298 | 7,88 | 966 | 9,74 | 303 |
| 4,20 | 4 | 6,06 | 296 | 7,92 | 1019 | 9,77 | 263 |
| 4,23 | 5 | 6,09 | 313 | 7,95 | 1017 | 9,81 | 230 |
| 4,26 | 5 | 6,12 | 326 | 7,98 | 1005 | 9,84 | 202 |
| 4,29 | 5 | 6,15 | 352 | 8,01 | 983 | 9,87 | 175 |
| 4,32 | 5 | 6,18 | 372 | 8,04 | 999 | 9,90 | 169 |
| 4,35 | 4 | 6,21 | 399 | 8,07 | 993 | 9,93 | 149 |
| 4,38 | 3 | 6,24 | 407 | 8,10 | 1015 | 9,96 | 122 |
| 4,41 | 4 | 6,27 | 420 | 8,13 | 1009 | 9,99 | 92 |
| 4,44 | 8 | 6,30 | 437 | 8,16 | 1019 | 10,02 | 70 |
| 4,48 | 9 | 6,33 | 458 | 8,19 | 988 | 10,05 | 43 |
| 4,51 | 6 | 6,37 | 462 | 8,22 | 1000 | 10,08 | 32 |
| 4,54 | 9 | 6,40 | 456 | 8,26 | 999 | 10,12 | 19 |
| 4,57 | 11 | 6,43 | 461 | 8,29 | 1053 | 10,15 | 10 |
| 4,60 | 11 | 6,46 | 491 | 8,32 | 1058 | 10,18 | 5 |
| 4,63 | 9 | 6,49 | 528 | 8,35 | 1038 | 10,21 | 4 |
| 4,66 | 12 | 6,52 | 535 | 8,38 | 1004 | 10,24 | 2 |
| 4,69 | 13 | 6,55 | 525 | 8,41 | 1012 | 10,27 | 3 |
| 4,72 | 17 | 6,58 | 535 | 8,44 | 1028 | 10,30 | 4 |
| 4,75 | 19 | 6,61 | 571 | 8,47 | 1041 | 10,33 | 2 |

Figura B.5: N10, distanza sorgente-rivelatore = 50 cm.

(segue) N10, distanza sorgente rivelatore = 50 cm

| E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi |
|---------|----------|---------|----------|---------|----------|---------|----------|
| 4,78 | 28 | 6,64 | 598 | 8,50 | 1038 | 10,36 | 3 |
| 4,82 | 25 | 6,68 | 604 | 8,53 | 1043 | 10,39 | 2 |
| 4,85 | 23 | 6,71 | 608 | 8,57 | 1040 | 10,42 | 1 |
| 4,88 | 18 | 6,74 | 636 | 8,60 | 1011 | 10,46 | 0 |
| 4,91 | 28 | 6,77 | 644 | 8,63 | 976 | 10,49 | 1 |
| 4,94 | 30 | 6,80 | 647 | 8,66 | 987 | 10,52 | 3 |
| 4,97 | 31 | 6,83 | 658 | 8,69 | 1019 | 10,55 | 2 |
| 5,00 | 32 | 6,86 | 704 | 8,72 | 988 | 10,58 | 3 |
| 5,03 | 43 | 6,89 | 719 | 8,75 | 977 | 10,61 | 2 |
| 5,06 | 50 | 6,92 | 735 | 8,78 | 977 | 10,64 | 1 |
| 5,09 | 56 | 6,95 | 726 | 8,81 | 980 | 10,67 | 2 |
| 5,13 | 57 | 6,99 | 726 | 8,84 | 930 | 10,70 | 4 |
| 5,16 | 59 | 7,02 | 741 | 8,88 | 907 | 10,73 | 4 |
| 5,19 | 55 | 7,05 | 745 | 8,91 | 904 | 10,77 | 3 |
| 5,22 | 60 | 7,08 | 711 | 8,94 | 897 | 10,80 | 2 |
| 5,25 | 70 | 7,11 | 704 | 8,97 | 877 | 10,83 | 3 |
| 5,28 | 75 | 7,14 | 731 | 9,00 | 841 | 10,86 | 4 |
| 5,31 | 80 | 7,17 | 764 | 9,03 | 867 | 10,89 | 4 |
| 5,34 | 89 | 7,20 | 752 | 9,06 | 864 | 10,92 | 3 |
| 5,37 | 96 | 7,23 | 748 | 9,09 | 848 | 10,95 | 3 |
| 5,40 | 105 | 7,26 | 762 | 9,12 | 808 | 10,98 | 3 |
| 5,44 | 112 | 7,30 | 775 | 9,15 | 805 | 11,01 | 3 |
| 5,47 | 115 | 7,33 | 782 | 9,19 | 778 | | |
| 5,50 | 125 | 7,36 | 823 | 9,22 | 760 | | |
| 5,53 | 134 | 7,39 | 873 | 9,25 | 758 | | |
| 5,56 | 140 | 7,42 | 860 | 9,28 | 730 | | |
| 5,59 | 143 | 7,45 | 823 | 9,31 | 700 | | |
| 5,62 | 161 | 7,48 | 857 | 9,34 | 669 | | |
| 5,65 | 169 | 7,51 | 882 | 9,37 | 658 | | |
| 5,68 | 170 | 7,54 | 875 | 9,40 | 658 | | |
| 5,71 | 187 | 7,57 | 864 | 9,43 | 633 | | |
| 5,75 | 205 | 7,61 | 892 | 9,46 | 595 | | |
| 5,78 | 210 | 7,64 | 913 | 9,50 | 558 | | |
| 5,81 | 211 | 7,67 | 900 | 9,53 | 542 | | |
| 5,84 | 221 | 7,70 | 936 | 9,56 | 513 | | |



| E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi |
|---------|----------|---------|----------|---------|----------|---------|----------|---------|----------|
| 7,02 | 1 | 8,88 | 115 | 10,73 | 590 | 12,59 | 1002 | 14,45 | 57 |
| 7,05 | 1 | 8,91 | 114 | 10,77 | 620 | 12,62 | 1027 | 14,48 | 45 |
| 7,08 | 3 | 8,94 | 113 | 10,80 | 659 | 12,66 | 978 | 14,51 | 33 |
| 7,11 | 3 | 8,97 | 110 | 10,83 | 689 | 12,69 | 982 | 14,55 | 20 |
| 7,14 | 3 | 9,00 | 116 | 10,86 | 682 | 12,72 | 1009 | 14,58 | 12 |
| 7,17 | 2 | 9,03 | 128 | 10,89 | 680 | 12,75 | 1007 | 14,61 | 8 |
| 7,20 | 2 | 9,06 | 144 | 10,92 | 668 | 12,78 | 977 | 14,64 | 5 |
| 7,23 | 4 | 9,09 | 151 | 10,95 | 661 | 12,81 | 941 | 14,67 | 4 |
| 7,26 | 7 | 9,12 | 141 | 10,98 | 658 | 12,84 | 915 | 14,70 | 5 |
| 7,30 | 8 | 9,15 | 138 | 11,01 | 676 | 12,87 | 884 | 14,73 | 5 |
| 7,33 | 8 | 9,19 | 152 | 11,04 | 735 | 12,90 | 852 | 14,76 | 2 |
| 7,36 | 9 | 9,22 | 169 | 11,08 | 822 | 12,93 | 842 | 14,79 | 1 |
| 7,39 | 10 | 9,25 | 184 | 11,11 | 926 | 12,97 | 784 | 14,82 | 0 |
| 7,42 | 10 | 9,28 | 180 | 11,14 | 993 | 13,00 | 748 | 14,86 | 0 |
| 7,45 | 7 | 9,31 | 187 | 11,17 | 992 | 13,03 | 694 | 14,89 | 1 |
| 7,48 | 7 | 9,34 | 202 | 11,20 | 929 | 13,06 | 700 | 14,92 | 1 |
| 7,51 | 7 | 9,37 | 239 | 11,23 | 854 | 13,09 | 688 | 14,95 | 1 |
| 7,54 | 6 | 9,40 | 257 | 11,26 | 801 | 13,12 | 692 | 14,98 | 1 |
| 7,57 | 6 | 9,43 | 306 | 11,29 | 768 | 13,15 | 689 | 15,01 | 2 |
| 7,61 | 7 | 9,46 | 378 | 11,32 | 744 | 13,18 | 676 | | |
| 7,64 | 8 | 9,50 | 524 | 11,35 | 741 | 13,21 | 681 | | |
| 7,67 | 8 | 9,53 | 692 | 11,39 | 747 | 13,24 | 664 | | |
| 7,70 | 10 | 9,56 | 766 | 11,42 | 778 | 13,28 | 658 | | |
| 7,73 | 15 | 9,59 | 720 | 11,45 | 824 | 13,31 | 667 | | |
| 7,76 | 17 | 9,62 | 627 | 11,48 | 858 | 13,34 | 685 | | |
| 7,79 | 18 | 9,65 | 541 | 11,51 | 854 | 13,37 | 663 | | |
| 7,82 | 18 | 9,68 | 445 | 11,54 | 857 | 13,40 | 639 | | |
| 7,85 | 20 | 9,71 | 434 | 11,57 | 842 | 13,43 | 645 | | |
| 7,88 | 24 | 9,74 | 515 | 11,60 | 809 | 13,46 | 638 | | |
| 7,92 | 30 | 9,77 | 642 | 11,63 | 783 | 13,49 | 636 | | |
| 7,95 | 28 | 9,81 | 773 | 11,66 | 804 | 13,52 | 625 | | |
| 7,98 | 31 | 9,84 | 853 | 11,70 | 835 | 13,55 | 611 | | |

Figura B.6: *N15*, distanza sorgente-rivelatore = 50 cm.

(segue) N15, distanza sorgente rivelatore = 50 cm

| E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi |
|---------|----------|---------|----------|---------|----------|---------|----------|---------|----------|
| 8,01 | 33 | 9,87 | 849 | 11,73 | 856 | 13,59 | 608 | | |
| 8,04 | 37 | 9,90 | 738 | 11,76 | 846 | 13,62 | 585 | | |
| 8,07 | 29 | 9,93 | 595 | 11,79 | 819 | 13,65 | 583 | | |
| 8,10 | 32 | 9,96 | 474 | 11,82 | 815 | 13,68 | 560 | | |
| 8,13 | 42 | 9,99 | 424 | 11,85 | 844 | 13,71 | 559 | | |
| 8,16 | 58 | 10,02 | 406 | 11,88 | 874 | 13,74 | 518 | | |
| 8,19 | 87 | 10,05 | 417 | 11,91 | 895 | 13,77 | 510 | | |
| 8,22 | 151 | 10,08 | 415 | 11,94 | 903 | 13,80 | 503 | | |
| 8,26 | 219 | 10,12 | 404 | 11,97 | 910 | 13,83 | 478 | | |
| 8,29 | 263 | 10,15 | 393 | 12,01 | 905 | 13,86 | 451 | | |
| 8,32 | 256 | 10,18 | 407 | 12,04 | 870 | 13,89 | 453 | | |
| 8,35 | 218 | 10,21 | 418 | 12,07 | 871 | 13,93 | 449 | | |
| 8,38 | 154 | 10,24 | 412 | 12,10 | 881 | 13,96 | 419 | | |
| 8,41 | 102 | 10,27 | 417 | 12,13 | 899 | 13,99 | 376 | | |
| 8,44 | 66 | 10,30 | 414 | 12,16 | 890 | 14,02 | 351 | | |
| 8,47 | 55 | 10,33 | 442 | 12,19 | 910 | 14,05 | 327 | | |
| 8,50 | 60 | 10,36 | 469 | 12,22 | 938 | 14,08 | 330 | | |
| 8,53 | 66 | 10,39 | 478 | 12,25 | 954 | 14,11 | 304 | | |
| 8,57 | 70 | 10,42 | 471 | 12,28 | 945 | 14,14 | 267 | | |
| 8,60 | 68 | 10,46 | 488 | 12,31 | 938 | 14,17 | 226 | | |
| 8,63 | 74 | 10,49 | 509 | 12,35 | 952 | 14,20 | 211 | | |
| 8,66 | 82 | 10,52 | 534 | 12,38 | 952 | 14,24 | 192 | | |
| 8,69 | 78 | 10,55 | 546 | 12,41 | 943 | 14,27 | 166 | | |
| 8,72 | 74 | 10,58 | 544 | 12,44 | 960 | 14,30 | 149 | | |
| 8,75 | 84 | 10,61 | 558 | 12,47 | 984 | 14,33 | 132 | | |
| 8,78 | 104 | 10,64 | 574 | 12,50 | 1010 | 14,36 | 116 | | |
| 8,81 | 113 | 10,67 | 585 | 12,53 | 989 | 14,39 | 89 | | |
| 8,84 | 113 | 10,70 | 576 | 12,56 | 1000 | 14,42 | 72 | | |

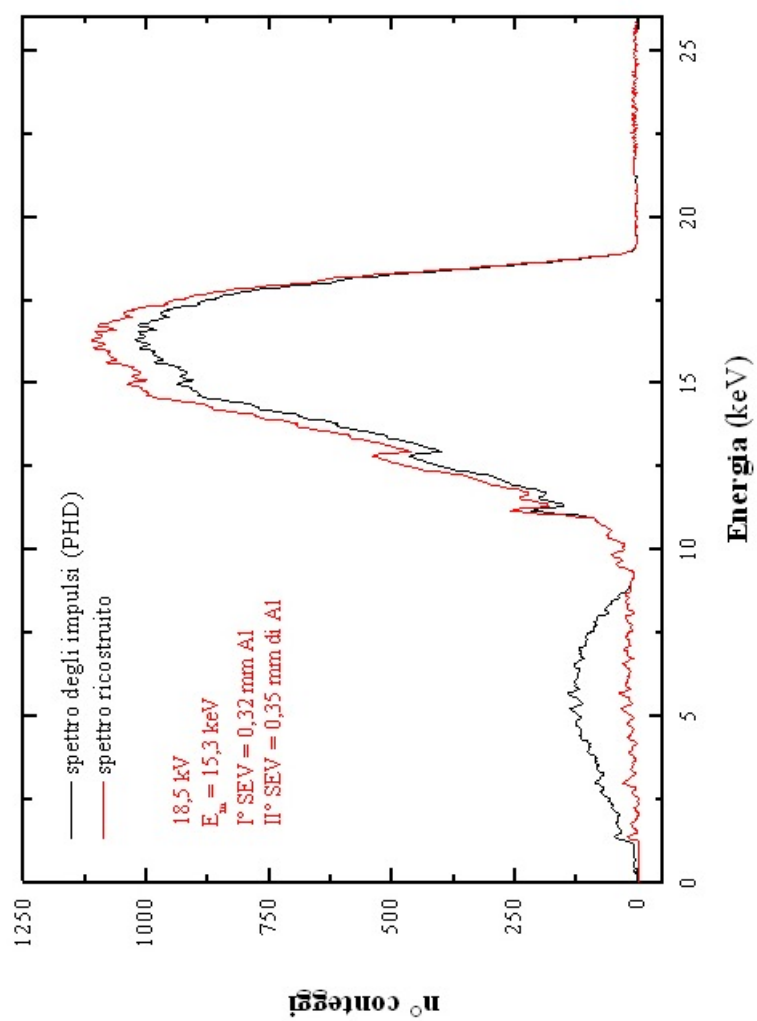


Figura B.7: *N20*, distanza sorgente rivelatore = 50 cm.

[illegible]

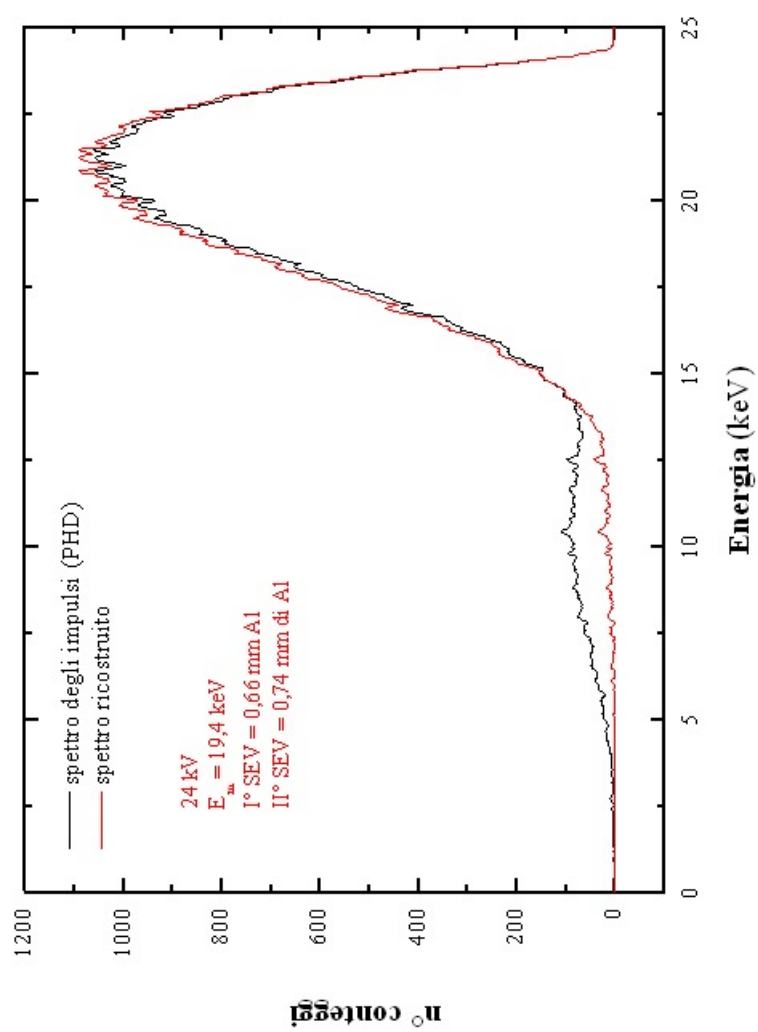


Figura B.8: *N25*, distanza sorgente rivelatore = 50 cm.

[illegible]

(segue)N25, distanza sorgente-rivelatore = 50 cm.

| | E conteggi (keV) | E conteggi (keV) | E conteggi (keV) | E conteggi (keV) | E conteggi (keV) | E conteggi (keV) | E conteggi (keV) | E conteggi (keV) | E conteggi (keV) | | | | |
|------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-------|------|-------|-----|
| 5.16 | 8 | 8.26 | 10 | 11.35 | 16 | 14.45 | 103 | 17.55 | 534 | 20.65 | 1016 | 23.74 | 396 |
| 5.19 | 5 | 8.29 | 9 | 11.39 | 14 | 14.48 | 103 | 17.58 | 540 | 20.68 | 1023 | 23.78 | 369 |
| 5.22 | 4 | 8.32 | 11 | 11.42 | 15 | 14.51 | 104 | 17.61 | 546 | 20.71 | 1022 | 23.81 | 335 |
| 5.25 | 4 | 8.35 | 10 | 11.45 | 14 | 14.55 | 107 | 17.64 | 557 | 20.74 | 1033 | 23.84 | 300 |
| 5.28 | 2 | 8.38 | 8 | 11.48 | 16 | 14.58 | 113 | 17.67 | 571 | 20.77 | 1046 | 23.87 | 270 |
| 5.31 | 2 | 8.41 | 7 | 11.51 | 20 | 14.61 | 117 | 17.71 | 582 | 20.80 | 1053 | 23.90 | 250 |
| 5.34 | 2 | 8.44 | 10 | 11.54 | 23 | 14.64 | 120 | 17.74 | 592 | 20.83 | 1057 | 23.93 | 227 |
| 5.37 | 3 | 8.47 | 12 | 11.57 | 24 | 14.67 | 124 | 17.77 | 597 | 20.86 | 1051 | 23.96 | 205 |
| 5.40 | 5 | 8.50 | 13 | 11.60 | 28 | 14.70 | 127 | 17.80 | 599 | 20.90 | 1032 | 23.99 | 186 |
| 5.44 | 5 | 8.53 | 14 | 11.63 | 27 | 14.73 | 132 | 17.83 | 596 | 20.93 | 1011 | 24.02 | 168 |
| 5.47 | 5 | 8.57 | 13 | 11.66 | 27 | 14.76 | 138 | 17.86 | 603 | 20.96 | 999 | 24.05 | 149 |
| 5.50 | 5 | 8.60 | 12 | 11.70 | 24 | 14.79 | 143 | 17.89 | 608 | 20.99 | 994 | 24.08 | 130 |
| 5.53 | 4 | 8.63 | 11 | 11.73 | 20 | 14.82 | 145 | 17.92 | 617 | 21.02 | 1007 | 24.12 | 110 |
| 5.56 | 3 | 8.66 | 12 | 11.76 | 15 | 14.86 | 147 | 17.95 | 625 | 21.05 | 1024 | 24.15 | 91 |
| 5.59 | 3 | 8.69 | 13 | 11.79 | 16 | 14.89 | 148 | 17.98 | 642 | 21.08 | 1038 | 24.18 | 78 |
| 5.62 | 1 | 8.72 | 14 | 11.82 | 17 | 14.92 | 150 | 18.01 | 649 | 21.11 | 1041 | 24.21 | 68 |
| 5.65 | 0 | 8.75 | 18 | 11.85 | 18 | 14.95 | 153 | 18.05 | 653 | 21.14 | 1047 | 24.24 | 57 |
| 5.68 | 0 | 8.78 | 20 | 11.88 | 19 | 14.98 | 154 | 18.08 | 651 | 21.17 | 1053 | 24.27 | 45 |
| 5.71 | 0 | 8.81 | 20 | 11.91 | 19 | 15.01 | 154 | 18.11 | 649 | 21.20 | 1059 | 24.30 | 32 |
| 5.75 | 0 | 8.84 | 18 | 11.94 | 17 | 15.04 | 153 | 18.14 | 641 | 21.24 | 1055 | 24.33 | 21 |
| 5.78 | 3 | 8.88 | 16 | 11.97 | 17 | 15.07 | 149 | 18.17 | 646 | 21.27 | 1053 | 24.36 | 13 |
| 5.81 | 6 | 8.91 | 11 | 12.01 | 16 | 15.10 | 147 | 18.20 | 661 | 21.30 | 1043 | 24.39 | 8 |
| 5.84 | 8 | 8.94 | 12 | 12.04 | 16 | 15.13 | 148 | 18.23 | 673 | 21.33 | 1032 | 24.43 | 6 |
| 5.87 | 8 | 8.97 | 12 | 12.07 | 18 | 15.17 | 155 | 18.26 | 680 | 21.36 | 1037 | 24.46 | 4 |
| 5.90 | 7 | 9.00 | 11 | 12.10 | 20 | 15.20 | 164 | 18.29 | 681 | 21.39 | 1052 | 24.49 | 4 |
| 5.93 | 7 | 9.03 | 12 | 12.13 | 23 | 15.23 | 173 | 18.32 | 684 | 21.42 | 1058 | 24.52 | 4 |
| 5.96 | 6 | 9.06 | 11 | 12.16 | 25 | 15.26 | 180 | 18.36 | 688 | 21.45 | 1060 | 24.55 | 4 |
| 5.99 | 7 | 9.09 | 8 | 12.19 | 26 | 15.29 | 183 | 18.39 | 705 | 21.48 | 1050 | 24.58 | 3 |
| 6.02 | 8 | 9.12 | 9 | 12.22 | 24 | 15.32 | 184 | 18.42 | 722 | 21.51 | 1026 | 24.61 | 3 |
| 6.06 | 12 | 9.15 | 9 | 12.25 | 21 | 15.35 | 185 | 18.45 | 733 | 21.55 | 1009 | 24.64 | 3 |
| 6.09 | 13 | 9.19 | 9 | 12.28 | 17 | 15.38 | 188 | 18.48 | 729 | 21.58 | 1008 | 24.67 | 4 |
| 6.12 | 12 | 9.22 | 12 | 12.31 | 20 | 15.41 | 194 | 18.51 | 732 | 21.61 | 1013 | 24.70 | 4 |
| 6.15 | 10 | 9.25 | 14 | 12.35 | 22 | 15.44 | 201 | 18.54 | 730 | 21.64 | 1022 | 24.73 | 4 |
| 6.18 | 6 | 9.28 | 14 | 12.38 | 28 | 15.47 | 208 | 18.57 | 737 | 21.67 | 1029 | 24.77 | 4 |
| 6.21 | 3 | 9.31 | 12 | 12.41 | 34 | 15.51 | 213 | 18.60 | 744 | 21.70 | 1021 | 24.80 | 4 |
| 6.24 | 3 | 9.34 | 10 | 12.44 | 38 | 15.54 | 215 | 18.63 | 771 | 21.73 | 1017 | 24.83 | 4 |

(segue)N25, distanza sorgente-rivelatore = 50 cm.

| | E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi |
|------|------------|----------|------------|----------|------------|----------|------------|----------|------------|----------|------------|----------|------------|----------|
| 6,27 | 4 | 9,37 | 11 | 12,47 | 41 | 15,57 | 218 | 18,67 | 778 | 21,76 | 1015 | 24,86 | 4 | |
| 6,30 | 4 | 9,40 | 11 | 12,50 | 45 | 15,60 | 218 | 18,70 | 792 | 21,79 | 1012 | 24,89 | 4 | |
| 6,33 | 5 | 9,43 | 10 | 12,53 | 40 | 15,63 | 218 | 18,73 | 792 | 21,82 | 1004 | 24,92 | 3 | |
| 6,37 | 5 | 9,46 | 13 | 12,56 | 36 | 15,66 | 218 | 18,76 | 794 | 21,86 | 995 | 24,95 | 3 | |
| 6,40 | 6 | 9,50 | 13 | 12,59 | 31 | 15,69 | 216 | 18,79 | 790 | 21,89 | 980 | 24,98 | 2 | |
| 6,43 | 9 | 9,53 | 13 | 12,62 | 25 | 15,72 | 218 | 18,82 | 800 | 21,92 | 975 | 25,01 | 2 | |
| 6,46 | 12 | 9,56 | 13 | 12,66 | 26 | 15,75 | 223 | 18,85 | 794 | 21,95 | 974 | 25,04 | 1 | |
| 6,49 | 14 | 9,59 | 13 | 12,69 | 25 | 15,78 | 228 | 18,88 | 799 | 21,98 | 972 | 25,08 | 1 | |
| 6,52 | 14 | 9,62 | 11 | 12,72 | 23 | 15,82 | 230 | 18,91 | 808 | 22,01 | 973 | 25,11 | 2 | |
| 6,55 | 14 | 9,65 | 11 | 12,75 | 23 | 15,85 | 232 | 18,94 | 817 | 22,04 | 971 | 25,14 | 3 | |
| 6,58 | 11 | 9,68 | 11 | 12,78 | 25 | 15,88 | 231 | 18,97 | 835 | 22,07 | 975 | 25,17 | 4 | |
| 6,61 | 11 | 9,71 | 13 | 12,81 | 26 | 15,91 | 239 | 19,01 | 845 | 22,10 | 983 | 25,20 | 5 | |
| 6,64 | 10 | 9,74 | 19 | 12,84 | 29 | 15,94 | 248 | 19,04 | 843 | 22,13 | 982 | 25,23 | 5 | |
| 6,68 | 8 | 9,77 | 22 | 12,87 | 28 | 15,97 | 254 | 19,07 | 838 | 22,16 | 978 | 25,26 | 4 | |
| 6,71 | 7 | 9,81 | 20 | 12,90 | 29 | 16,00 | 262 | 19,10 | 843 | 22,20 | 970 | 25,29 | 4 | |
| 6,74 | 9 | 9,84 | 18 | 12,93 | 30 | 16,03 | 264 | 19,13 | 842 | 22,23 | 958 | 25,32 | 3 | |
| 6,77 | 8 | 9,87 | 14 | 12,97 | 29 | 16,06 | 266 | 19,16 | 846 | 22,26 | 958 | 25,35 | 3 | |
| 6,80 | 8 | 9,90 | 11 | 13,00 | 29 | 16,09 | 274 | 19,19 | 853 | 22,29 | 951 | 25,39 | 3 | |
| 6,83 | 9 | 9,93 | 16 | 13,03 | 30 | 16,13 | 284 | 19,22 | 859 | 22,32 | 937 | 25,42 | 2 | |
| 6,86 | 8 | 9,96 | 18 | 13,06 | 26 | 16,16 | 293 | 19,25 | 868 | 22,35 | 930 | 25,45 | 2 | |
| 6,89 | 7 | 9,99 | 17 | 13,09 | 25 | 16,19 | 308 | 19,28 | 887 | 22,38 | 912 | 25,48 | 2 | |
| 6,92 | 7 | 10,02 | 15 | 13,12 | 27 | 16,22 | 312 | 19,32 | 897 | 22,41 | 898 | 25,51 | 1 | |
| 6,95 | 8 | 10,05 | 12 | 13,15 | 28 | 16,25 | 315 | 19,35 | 903 | 22,44 | 905 | 25,54 | 1 | |
| 6,99 | 6 | 10,08 | 11 | 13,18 | 28 | 16,28 | 313 | 19,38 | 913 | 22,47 | 908 | 25,57 | 2 | |
| 7,02 | 5 | 10,12 | 13 | 13,21 | 27 | 16,31 | 312 | 19,41 | 922 | 22,51 | 914 | 25,60 | 2 | |
| 7,05 | 4 | 10,15 | 15 | 13,24 | 27 | 16,34 | 315 | 19,44 | 929 | 22,54 | 923 | 25,63 | 3 | |
| 7,08 | 3 | 10,18 | 16 | 13,28 | 30 | 16,37 | 321 | 19,47 | 938 | 22,57 | 909 | 25,66 | 2 | |

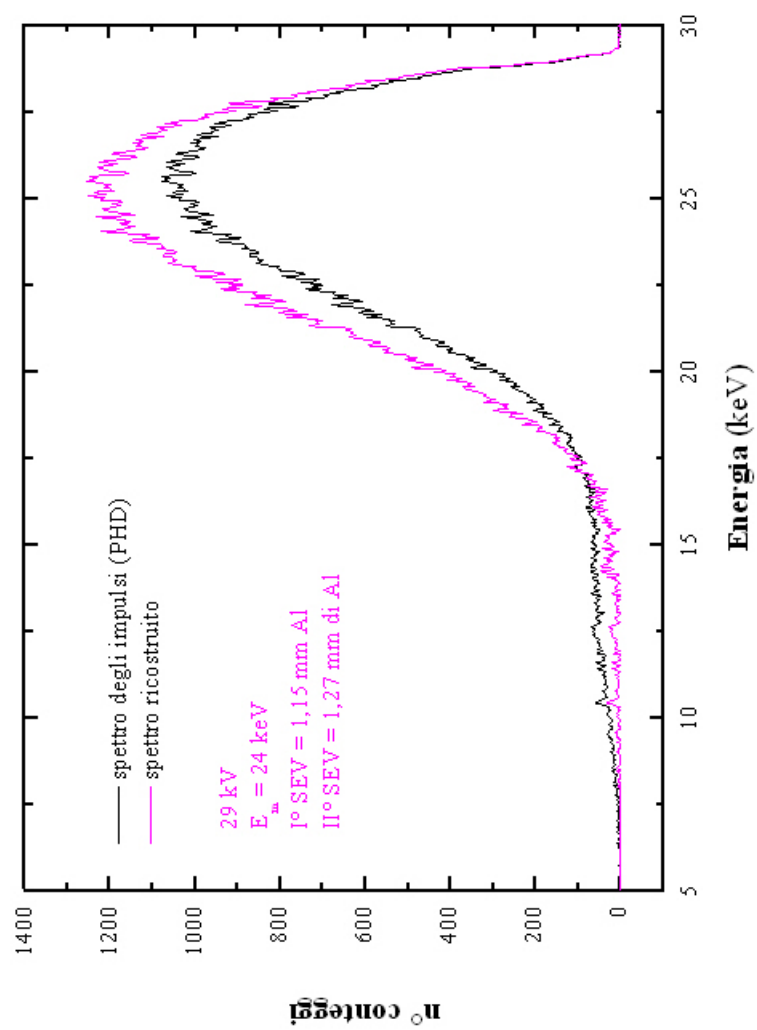


Figura B.9: *N30*, distanza sorgente rivelatore = 50 cm.

[illegible]

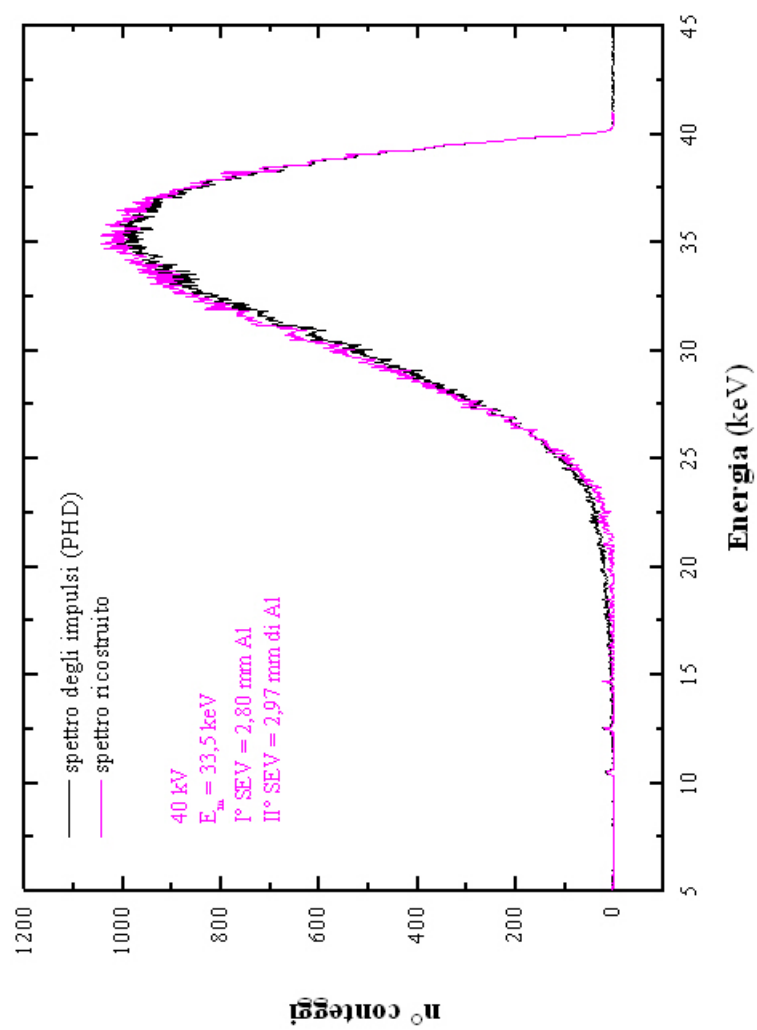


Figura B.10: *N40*, distanza sorgente rivelatore = 50 cm.

| | E cont, (keV) | E cont, (keV) | E cont, (keV) | E cont, (keV) | E cont, (keV) | E cont, (keV) | E cont, (keV) | E cont, (keV) | E cont, (keV) | E cont, (keV) | E cont, (keV) | E cont, (keV) | E cont, (keV) | E cont, (keV) | E cont, (keV) | E cont, (keV) | E cont, (keV) | E cont, (keV) | E cont, (keV) | E cont, (keV) | E cont, (keV) | |
|--|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|-----|
| | 20 | 5 | 21.86 | 11 | 23.71 | 45 | 25.57 | 136 | 27.43 | 307 | 29.32 | 494 | 31.14 | 729 | 33 | 929 | 34.86 | 1044 | 36.71 | 967 | 38.57 | 617 |
| | 20.03 | 5 | 21.89 | 13 | 23.74 | 46 | 25.6 | 143 | 27.46 | 288 | 29.32 | 493 | 31.17 | 739 | 33.03 | 942 | 34.89 | 1044 | 36.75 | 978 | 38.6 | 621 |
| | 20.06 | 1 | 21.92 | 20 | 23.78 | 56 | 25.63 | 142 | 27.49 | 294 | 29.35 | 506 | 31.21 | 718 | 33.06 | 925 | 34.92 | 1030 | 36.78 | 949 | 38.63 | 624 |
| | 20.09 | 2 | 21.95 | 18 | 23.81 | 58 | 25.66 | 138 | 27.52 | 291 | 29.38 | 504 | 31.24 | 724 | 33.09 | 890 | 34.95 | 999 | 36.81 | 940 | 38.66 | 619 |
| | 20.12 | 6 | 21.98 | 15 | 23.84 | 55 | 25.69 | 138 | 27.55 | 286 | 29.41 | 519 | 31.27 | 728 | 33.12 | 897 | 34.98 | 1000 | 36.84 | 946 | 38.7 | 619 |
| | 20.15 | 8 | 22.01 | 28 | 23.87 | 58 | 25.73 | 144 | 27.58 | 278 | 29.44 | 494 | 31.3 | 745 | 33.16 | 929 | 35.01 | 1023 | 36.87 | 955 | 38.73 | 595 |
| | 20.18 | 5 | 22.04 | 34 | 23.9 | 55 | 25.76 | 137 | 27.61 | 313 | 29.47 | 494 | 31.33 | 737 | 33.19 | 934 | 35.04 | 1022 | 36.9 | 939 | 38.76 | 596 |
| | 20.21 | 6 | 22.07 | 21 | 23.93 | 44 | 25.79 | 143 | 27.65 | 322 | 29.5 | 487 | 31.36 | 751 | 33.22 | 893 | 35.07 | 993 | 36.93 | 951 | 38.79 | 559 |
| | 20.24 | 11 | 22.1 | 16 | 23.96 | 49 | 25.82 | 149 | 27.68 | 306 | 29.53 | 503 | 31.39 | 740 | 33.25 | 879 | 35.11 | 989 | 36.96 | 960 | 38.82 | 545 |
| | 20.28 | 5 | 22.13 | 21 | 23.99 | 60 | 25.85 | 159 | 27.71 | 308 | 29.56 | 509 | 31.42 | 734 | 33.28 | 916 | 35.14 | 1017 | 36.99 | 953 | 38.85 | 531 |
| | 20.31 | 0 | 22.16 | 30 | 24.02 | 60 | 25.88 | 157 | 27.74 | 327 | 29.6 | 516 | 31.45 | 738 | 33.31 | 951 | 35.17 | 1000 | 37.02 | 900 | 38.88 | 547 |
| | 20.34 | 2 | 22.2 | 22 | 24.05 | 64 | 25.91 | 157 | 27.77 | 322 | 29.63 | 524 | 31.48 | 742 | 33.34 | 945 | 35.2 | 998 | 37.05 | 918 | 38.91 | 528 |
| | 20.37 | 9 | 22.23 | 14 | 24.08 | 65 | 25.94 | 161 | 27.8 | 316 | 29.66 | 542 | 31.51 | 754 | 33.37 | 924 | 35.23 | 1028 | 37.09 | 931 | 38.94 | 539 |
| | 20.4 | 3 | 22.26 | 15 | 24.12 | 59 | 25.97 | 163 | 27.83 | 328 | 29.69 | 547 | 31.55 | 767 | 33.4 | 913 | 35.26 | 1045 | 37.12 | 919 | 38.97 | 546 |
| | 20.43 | 4 | 22.29 | 24 | 24.15 | 59 | 26 | 170 | 27.86 | 334 | 29.72 | 541 | 31.58 | 768 | 33.43 | 885 | 35.29 | 1041 | 37.15 | 892 | 39 | 547 |
| | 20.46 | 8 | 22.32 | 30 | 24.18 | 63 | 26.04 | 177 | 27.89 | 324 | 29.75 | 553 | 31.61 | 758 | 33.46 | 931 | 35.32 | 1003 | 37.18 | 896 | 39.04 | 494 |
| | 20.49 | 10 | 22.35 | 27 | 24.21 | 68 | 26.07 | 175 | 27.92 | 330 | 29.78 | 551 | 31.64 | 756 | 33.5 | 968 | 35.35 | 1000 | 37.21 | 906 | 39.07 | 470 |
| | 20.52 | 3 | 22.38 | 26 | 24.24 | 70 | 26.1 | 167 | 27.95 | 354 | 29.81 | 546 | 31.67 | 767 | 33.53 | 958 | 35.38 | 987 | 37.24 | 888 | 39.1 | 468 |
| | 20.55 | 5 | 22.41 | 22 | 24.27 | 66 | 26.13 | 167 | 27.99 | 361 | 29.84 | 568 | 31.7 | 761 | 33.56 | 896 | 35.41 | 1010 | 37.27 | 898 | 39.13 | 477 |
| | 20.59 | 9 | 22.44 | 12 | 24.3 | 67 | 26.16 | 171 | 28.02 | 357 | 29.87 | 577 | 31.73 | 755 | 33.59 | 906 | 35.45 | 1023 | 37.3 | 897 | 39.16 | 439 |
| | 20.62 | 7 | 22.47 | 8 | 24.33 | 74 | 26.19 | 174 | 28.05 | 351 | 29.91 | 553 | 31.76 | 743 | 33.62 | 952 | 35.48 | 1012 | 37.33 | 904 | 39.19 | 416 |
| | 20.65 | 0 | 22.51 | 16 | 24.36 | 69 | 26.22 | 170 | 28.08 | 347 | 29.94 | 536 | 31.79 | 788 | 33.65 | 969 | 35.51 | 987 | 37.36 | 899 | 39.22 | 405 |
| | 20.68 | 0 | 22.54 | 23 | 24.39 | 67 | 26.25 | 158 | 28.11 | 338 | 29.97 | 530 | 31.82 | 832 | 33.68 | 949 | 35.54 | 965 | 37.4 | 892 | 39.25 | 397 |
| | 20.71 | 2 | 22.57 | 19 | 24.43 | 79 | 26.28 | 176 | 28.14 | 356 | 30 | 554 | 31.86 | 830 | 33.71 | 934 | 35.57 | 969 | 37.43 | 865 | 39.28 | 382 |
| | 20.74 | 8 | 22.6 | 20 | 24.46 | 95 | 26.31 | 192 | 28.17 | 363 | 30.03 | 580 | 31.89 | 781 | 33.74 | 941 | 35.6 | 968 | 37.46 | 852 | 39.31 | 376 |
| | 20.77 | 12 | 22.63 | 25 | 24.49 | 88 | 26.35 | 199 | 28.2 | 375 | 30.06 | 592 | 31.92 | 796 | 33.77 | 942 | 35.63 | 989 | 37.49 | 855 | 39.34 | 364 |
| | 20.8 | 15 | 22.66 | 26 | 24.52 | 74 | 26.38 | 196 | 28.23 | 380 | 30.09 | 572 | 31.95 | 819 | 33.81 | 960 | 35.66 | 1006 | 37.52 | 862 | 39.38 | 360 |
| | 20.83 | 2 | 22.69 | 25 | 24.55 | 76 | 26.41 | 202 | 28.26 | 390 | 30.12 | 571 | 31.98 | 800 | 33.84 | 941 | 35.69 | 1015 | 37.55 | 848 | 39.41 | 357 |
| | 20.86 | 0 | 22.72 | 27 | 24.58 | 77 | 26.44 | 195 | 28.3 | 370 | 30.15 | 568 | 32.01 | 784 | 33.87 | 922 | 35.72 | 1036 | 37.58 | 835 | 39.44 | 344 |
| | 20.9 | 0 | 22.75 | 24 | 24.61 | 76 | 26.47 | 206 | 28.33 | 364 | 30.18 | 555 | 32.04 | 802 | 33.9 | 922 | 35.76 | 1009 | 37.61 | 826 | 39.47 | 306 |
| | 20.93 | 12 | 22.78 | 22 | 24.64 | 74 | 26.5 | 211 | 28.36 | 389 | 30.21 | 569 | 32.07 | 813 | 33.93 | 963 | 35.79 | 1005 | 37.64 | 848 | 39.5 | 303 |
| | 20.96 | 19 | 22.82 | 19 | 24.67 | 80 | 26.53 | 210 | 28.39 | 390 | 30.25 | 597 | 32.1 | 792 | 33.96 | 987 | 35.82 | 1015 | 37.67 | 863 | 39.53 | 288 |
| | 20.99 | 20 | 22.85 | 19 | 24.7 | 89 | 26.56 | 194 | 28.42 | 386 | 30.28 | 605 | 32.13 | 820 | 33.99 | 968 | 35.85 | 1016 | 37.7 | 857 | 39.56 | 275 |
| | 21.02 | 14 | 22.88 | 22 | 24.73 | 94 | 26.59 | 203 | 28.45 | 376 | 30.31 | 631 | 32.16 | 848 | 34.02 | 959 | 35.88 | 1011 | 37.74 | 833 | 39.59 | 250 |
| | 21.05 | 11 | 22.91 | 24 | 24.77 | 97 | 26.62 | 219 | 28.48 | 411 | 30.34 | 596 | 32.2 | 855 | 34.05 | 969 | 35.91 | 989 | 37.77 | 833 | 39.62 | 237 |
| | 21.08 | 9 | 22.94 | 30 | 24.8 | 92 | 26.65 | 222 | 28.51 | 401 | 30.37 | 611 | 32.23 | 837 | 34.08 | 994 | 35.94 | 999 | 37.8 | 829 | 39.65 | 216 |
| | 21.11 | 9 | 22.97 | 32 | 24.83 | 98 | 26.69 | 217 | 28.54 | 406 | 30.4 | 636 | 32.26 | 822 | 34.11 | 988 | 35.97 | 981 | 37.83 | 799 | 39.69 | 203 |

(segue)N40, distanza sorgente-rivelatore = 50 cm.

| | E cont, (keV) | E cont, (keV) | E cont, (keV) | E cont, (keV) | E cont, (keV) | E cont, (keV) | E cont, (keV) | E cont, (keV) | E cont, (keV) | E cont, (keV) | E cont, (keV) | E cont, (keV) | E cont, (keV) | E cont, (keV) | E cont, (keV) | E cont, (keV) | E cont, (keV) | E cont, (keV) | E cont, (keV) | E cont, (keV) | |
|-------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|-----|
| 21.17 | 5 | 23.03 | 31 | 24.89 | 91 | 26.75 | 217 | 28.61 | 423 | 30.46 | 645 | 32.32 | 830 | 34.18 | 977 | 36.03 | 999 | 37.89 | 773 | 39.75 | 176 |
| 21.2 | 6 | 23.06 | 29 | 24.92 | 83 | 26.78 | 212 | 28.64 | 432 | 30.49 | 636 | 32.35 | 844 | 34.21 | 969 | 36.06 | 985 | 37.92 | 783 | 39.78 | 149 |
| 21.24 | 11 | 23.09 | 21 | 24.95 | 94 | 26.81 | 204 | 28.67 | 440 | 30.52 | 635 | 32.38 | 850 | 34.24 | 967 | 36.1 | 959 | 37.95 | 783 | 39.81 | 123 |
| 21.27 | 4 | 23.12 | 30 | 24.98 | 115 | 26.84 | 207 | 28.7 | 415 | 30.56 | 639 | 32.41 | 872 | 34.27 | 953 | 36.13 | 962 | 37.98 | 795 | 39.84 | 104 |
| 21.3 | 3 | 23.16 | 32 | 25.01 | 111 | 26.87 | 222 | 28.73 | 410 | 30.59 | 644 | 32.44 | 865 | 34.3 | 954 | 36.16 | 1003 | 38.01 | 765 | 39.87 | 91 |
| 21.33 | 1 | 23.19 | 37 | 25.04 | 95 | 26.9 | 236 | 28.76 | 422 | 30.62 | 671 | 32.47 | 885 | 34.33 | 964 | 36.19 | 999 | 38.05 | 753 | 39.9 | 76 |
| 21.36 | 5 | 23.22 | 33 | 25.08 | 91 | 26.93 | 251 | 28.79 | 437 | 30.65 | 650 | 32.51 | 846 | 34.36 | 975 | 36.22 | 991 | 38.08 | 740 | 39.93 | 63 |
| 21.39 | 5 | 23.25 | 33 | 25.11 | 94 | 26.96 | 253 | 28.82 | 434 | 30.68 | 652 | 32.54 | 865 | 34.39 | 981 | 36.25 | 990 | 38.11 | 780 | 39.96 | 54 |
| 21.42 | 8 | 23.28 | 26 | 25.14 | 97 | 27 | 258 | 28.85 | 424 | 30.71 | 656 | 32.57 | 891 | 34.42 | 1001 | 36.28 | 988 | 38.14 | 801 | 39.99 | 43 |
| 21.45 | 5 | 23.31 | 32 | 25.17 | 113 | 27.03 | 251 | 28.88 | 430 | 30.74 | 662 | 32.6 | 897 | 34.46 | 1011 | 36.31 | 994 | 38.17 | 792 | 40.03 | 30 |
| 21.48 | 12 | 23.34 | 29 | 25.2 | 125 | 27.06 | 257 | 28.91 | 455 | 30.77 | 654 | 32.63 | 884 | 34.49 | 996 | 36.34 | 958 | 38.2 | 726 | 40.06 | 19 |
| 21.51 | 19 | 23.37 | 31 | 25.23 | 133 | 27.09 | 257 | 28.95 | 450 | 30.8 | 649 | 32.66 | 876 | 34.52 | 1000 | 36.37 | 952 | 38.23 | 694 | 40.09 | 11 |
| 21.55 | 19 | 23.4 | 36 | 25.26 | 127 | 27.12 | 255 | 28.98 | 414 | 30.83 | 646 | 32.69 | 879 | 34.55 | 998 | 36.41 | 952 | 38.26 | 683 | 40.12 | 6 |
| 21.58 | 12 | 23.43 | 43 | 25.29 | 125 | 27.15 | 240 | 29.01 | 433 | 30.86 | 628 | 32.72 | 885 | 34.58 | 996 | 36.44 | 1011 | 38.29 | 710 | 40.15 | 6 |
| 21.61 | 14 | 23.47 | 40 | 25.32 | 106 | 27.18 | 253 | 29.04 | 477 | 30.9 | 664 | 32.75 | 888 | 34.61 | 988 | 36.47 | 982 | 38.32 | 714 | 40.18 | 7 |
| 21.64 | 13 | 23.5 | 35 | 25.35 | 118 | 27.21 | 247 | 29.07 | 463 | 30.93 | 680 | 32.78 | 895 | 34.64 | 1020 | 36.5 | 965 | 38.35 | 723 | 40.21 | 4 |
| 21.67 | 13 | 23.53 | 41 | 25.39 | 132 | 27.24 | 261 | 29.1 | 453 | 30.96 | 666 | 32.81 | 891 | 34.67 | 1037 | 36.53 | 946 | 38.39 | 713 | 40.24 | 3 |
| 21.7 | 16 | 23.56 | 44 | 25.42 | 135 | 27.27 | 275 | 29.13 | 485 | 30.99 | 665 | 32.85 | 916 | 34.7 | 1016 | 36.56 | 957 | 38.42 | 690 | 40.27 | 3 |
| 21.73 | 24 | 23.59 | 37 | 25.45 | 132 | 27.3 | 309 | 29.16 | 494 | 31.02 | 670 | 32.88 | 902 | 34.73 | 984 | 36.59 | 971 | 38.45 | 659 | 40.3 | 2 |
| 21.76 | 21 | 23.62 | 27 | 25.48 | 134 | 27.34 | 281 | 29.19 | 465 | 31.05 | 702 | 32.91 | 892 | 34.76 | 998 | 36.62 | 963 | 38.48 | 645 | 40.33 | 0 |
| 21.79 | 20 | 23.65 | 27 | 25.51 | 138 | 27.37 | 270 | 29.22 | 467 | 31.08 | 714 | 32.94 | 883 | 34.8 | 1016 | 36.65 | 944 | 38.51 | 630 | 40.37 | 1 |
| 21.82 | 16 | 23.68 | 45 | 25.54 | 133 | 27.4 | 384 | 29.26 | 485 | 31.11 | 728 | 32.97 | 906 | 34.83 | 1032 | 36.68 | 945 | 38.54 | 618 | 40.4 | 1 |

B.1.3 Serie H

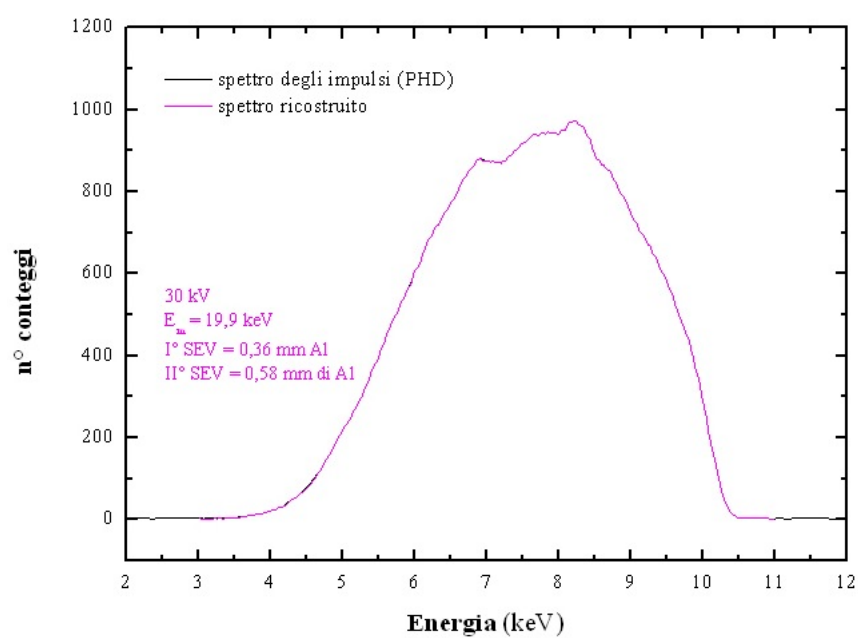


Figura B.11: *H10*, distanza sorgente rivelatore = 50 cm.

| E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi |
|---------|----------|---------|----------|---------|----------|---------|----------|---------|----------|
| 3,02 | 1 | 4,88 | 130 | 6,74 | 754 | 8,60 | 818 | 10,46 | 7 |
| 3,05 | 1 | 4,91 | 139 | 6,77 | 762 | 8,63 | 819 | 10,49 | 4 |
| 3,08 | 1 | 4,94 | 147 | 6,80 | 770 | 8,66 | 813 | 10,52 | 3 |
| 3,11 | 1 | 4,97 | 155 | 6,83 | 777 | 8,69 | 809 | 10,55 | 4 |
| 3,14 | 1 | 5,00 | 163 | 6,86 | 786 | 8,72 | 804 | 10,58 | 4 |
| 3,17 | 1 | 5,03 | 172 | 6,89 | 790 | 8,75 | 797 | 10,61 | 3 |
| 3,20 | 1 | 5,06 | 179 | 6,92 | 795 | 8,78 | 786 | 10,64 | 3 |
| 3,24 | 1 | 5,09 | 186 | 6,95 | 790 | 8,81 | 774 | 10,67 | 3 |
| 3,27 | 1 | 5,13 | 195 | 6,99 | 791 | 8,84 | 762 | 10,70 | 2 |
| 3,30 | 1 | 5,16 | 205 | 7,02 | 790 | 8,88 | 755 | 10,73 | 3 |
| 3,33 | 1 | 5,19 | 212 | 7,05 | 790 | 8,91 | 748 | 10,77 | 3 |
| 3,36 | 1 | 5,22 | 223 | 7,08 | 792 | 8,94 | 737 | 10,80 | 3 |
| 3,39 | 1 | 5,25 | 231 | 7,11 | 791 | 8,97 | 726 | 10,83 | 3 |
| 3,42 | 1 | 5,28 | 239 | 7,14 | 793 | 9,00 | 715 | 10,86 | 3 |
| 3,45 | 1 | 5,31 | 250 | 7,17 | 793 | 9,03 | 702 | 10,89 | 3 |
| 3,48 | 1 | 5,34 | 262 | 7,20 | 793 | 9,06 | 694 | 10,92 | 2 |
| 3,51 | 1 | 5,37 | 272 | 7,23 | 798 | 9,09 | 686 | 10,95 | 2 |
| 3,55 | 2 | 5,40 | 285 | 7,26 | 799 | 9,12 | 673 | 10,98 | 2 |
| 3,58 | 2 | 5,44 | 299 | 7,30 | 809 | 9,15 | 665 | 11,01 | 2 |
| 3,61 | 3 | 5,47 | 309 | 7,33 | 812 | 9,19 | 660 | | |
| 3,64 | 3 | 5,50 | 319 | 7,36 | 816 | 9,22 | 649 | | |
| 3,67 | 4 | 5,53 | 332 | 7,39 | 826 | 9,25 | 640 | | |
| 3,70 | 5 | 5,56 | 345 | 7,42 | 829 | 9,28 | 636 | | |
| 3,73 | 5 | 5,59 | 358 | 7,45 | 835 | 9,31 | 621 | | |
| 3,76 | 5 | 5,62 | 372 | 7,48 | 844 | 9,34 | 614 | | |
| 3,79 | 6 | 5,65 | 382 | 7,51 | 845 | 9,37 | 603 | | |
| 3,82 | 7 | 5,68 | 392 | 7,54 | 850 | 9,40 | 591 | | |
| 3,86 | 8 | 5,71 | 406 | 7,57 | 855 | 9,43 | 576 | | |
| 3,89 | 8 | 5,75 | 415 | 7,61 | 862 | 9,46 | 571 | | |
| 3,92 | 9 | 5,78 | 426 | 7,64 | 866 | 9,50 | 559 | | |
| 3,95 | 10 | 5,81 | 440 | 7,67 | 869 | 9,53 | 546 | | |
| 3,98 | 11 | 5,84 | 451 | 7,70 | 868 | 9,56 | 534 | | |
| 4,01 | 12 | 5,87 | 461 | 7,73 | 870 | 9,59 | 517 | | |
| 4,04 | 13 | 5,90 | 472 | 7,76 | 876 | 9,62 | 505 | | |
| 4,07 | 14 | 5,93 | 483 | 7,79 | 877 | 9,65 | 495 | | |
| 4,10 | 16 | 5,96 | 492 | 7,82 | 875 | 9,68 | 481 | | |
| 4,13 | 18 | 5,99 | 509 | 7,85 | 881 | 9,71 | 466 | | |
| 4,17 | 19 | 6,02 | 520 | 7,88 | 880 | 9,74 | 452 | | |
| 4,20 | 22 | 6,06 | 528 | 7,92 | 881 | 9,77 | 440 | | |
| 4,23 | 24 | 6,09 | 542 | 7,95 | 881 | 9,81 | 421 | | |
| 4,26 | 27 | 6,12 | 558 | 7,98 | 879 | 9,84 | 400 | | |
| 4,29 | 29 | 6,15 | 569 | 8,01 | 879 | 9,87 | 382 | | |
| 4,32 | 32 | 6,18 | 580 | 8,04 | 888 | 9,90 | 360 | | |
| 4,35 | 35 | 6,21 | 593 | 8,07 | 889 | 9,93 | 340 | | |
| 4,38 | 38 | 6,24 | 601 | 8,10 | 891 | 9,96 | 318 | | |
| 4,41 | 42 | 6,27 | 609 | 8,13 | 904 | 9,99 | 293 | | |
| 4,44 | 45 | 6,30 | 621 | 8,16 | 910 | 10,02 | 267 | | |
| 4,48 | 49 | 6,33 | 626 | 8,19 | 909 | 10,05 | 238 | | |
| 4,51 | 53 | 6,37 | 640 | 8,22 | 913 | 10,08 | 208 | | |
| 4,54 | 58 | 6,40 | 650 | 8,26 | 911 | 10,12 | 181 | | |
| 4,57 | 63 | 6,43 | 660 | 8,29 | 906 | 10,15 | 155 | | |
| 4,60 | 68 | 6,46 | 665 | 8,32 | 903 | 10,18 | 132 | | |
| 4,63 | 73 | 6,49 | 674 | 8,35 | 901 | 10,21 | 107 | | |
| 4,66 | 79 | 6,52 | 684 | 8,38 | 891 | 10,24 | 87 | | |
| 4,69 | 85 | 6,55 | 690 | 8,41 | 882 | 10,27 | 66 | | |
| 4,72 | 93 | 6,58 | 700 | 8,44 | 874 | 10,30 | 49 | | |
| 4,75 | 100 | 6,61 | 713 | 8,47 | 857 | 10,33 | 35 | | |

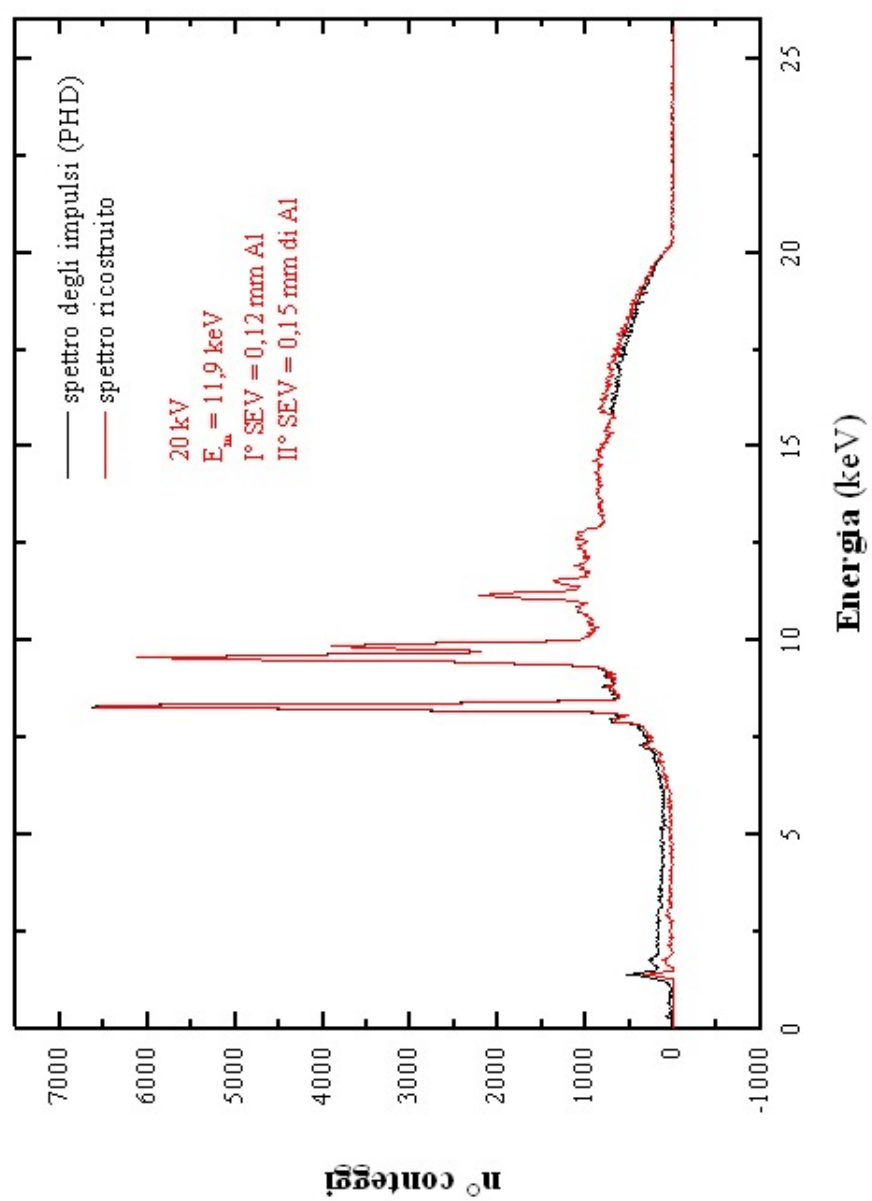


Figura B.12: *H20*, distanza sorgente rivelatore = 50 cm.

| E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi |
|------------|----------|------------|----------|------------|----------|------------|----------|------------|----------|------------|----------|------------|----------|
| 1,00 | 0 | 4,10 | 18 | 7,20 | 253 | 10,30 | 873 | 13,40 | 827 | 16,50 | 617 | 19,59 | 236 |
| 1,03 | 0 | 4,13 | 11 | 7,23 | 282 | 10,33 | 861 | 13,43 | 839 | 16,53 | 658 | 19,63 | 185 |
| 1,07 | 0 | 4,17 | 16 | 7,26 | 303 | 10,36 | 950 | 13,46 | 847 | 16,56 | 609 | 19,66 | 196 |
| 1,10 | 0 | 4,20 | 4 | 7,30 | 332 | 10,39 | 951 | 13,49 | 857 | 16,59 | 612 | 19,69 | 201 |
| 1,13 | 0 | 4,23 | 30 | 7,33 | 291 | 10,42 | 921 | 13,52 | 809 | 16,62 | 664 | 19,72 | 187 |
| 1,16 | 0 | 4,26 | 18 | 7,36 | 251 | 10,46 | 989 | 13,55 | 823 | 16,65 | 628 | 19,75 | 169 |
| 1,19 | 0 | 4,29 | 24 | 7,39 | 234 | 10,49 | 944 | 13,59 | 809 | 16,68 | 620 | 19,78 | 153 |
| 1,22 | 0 | 4,32 | 12 | 7,42 | 255 | 10,52 | 907 | 13,62 | 828 | 16,71 | 656 | 19,81 | 148 |
| 1,25 | 0 | 4,35 | 14 | 7,45 | 239 | 10,55 | 938 | 13,65 | 860 | 16,74 | 642 | 19,84 | 127 |
| 1,28 | 50 | 4,38 | 8 | 7,48 | 275 | 10,58 | 983 | 13,68 | 847 | 16,78 | 616 | 19,87 | 136 |
| 1,31 | 135 | 4,41 | 29 | 7,51 | 255 | 10,61 | 1008 | 13,71 | 866 | 16,81 | 587 | 19,90 | 126 |
| 1,34 | 276 | 4,44 | 9 | 7,54 | 298 | 10,64 | 988 | 13,74 | 876 | 16,84 | 624 | 19,94 | 98 |
| 1,38 | 348 | 4,48 | 34 | 7,57 | 290 | 10,67 | 1065 | 13,77 | 847 | 16,87 | 619 | 19,97 | 92 |
| 1,41 | 182 | 4,51 | 28 | 7,61 | 294 | 10,70 | 1076 | 13,80 | 867 | 16,90 | 616 | 20,00 | 78 |
| 1,44 | 68 | 4,54 | 15 | 7,64 | 320 | 10,73 | 1087 | 13,83 | 860 | 16,93 | 617 | 20,03 | 64 |
| 1,47 | 7 | 4,57 | 16 | 7,67 | 319 | 10,77 | 1058 | 13,86 | 873 | 16,96 | 599 | 20,06 | 68 |
| 1,50 | 0 | 4,60 | 6 | 7,70 | 350 | 10,80 | 1071 | 13,89 | 880 | 16,99 | 641 | 20,09 | 33 |
| 1,53 | 0 | 4,63 | 13 | 7,73 | 338 | 10,83 | 1074 | 13,93 | 841 | 17,02 | 628 | 20,12 | 33 |
| 1,56 | 19 | 4,66 | 24 | 7,76 | 342 | 10,86 | 1098 | 13,96 | 815 | 17,05 | 623 | 20,15 | 17 |
| 1,59 | 33 | 4,69 | 47 | 7,79 | 387 | 10,89 | 1017 | 13,99 | 851 | 17,09 | 651 | 20,18 | 27 |
| 1,62 | 61 | 4,72 | 9 | 7,82 | 429 | 10,92 | 1026 | 14,02 | 861 | 17,12 | 610 | 20,21 | 19 |
| 1,65 | 78 | 4,75 | 14 | 7,85 | 470 | 10,95 | 983 | 14,05 | 852 | 17,15 | 590 | 20,24 | 8 |
| 1,69 | 95 | 4,78 | 18 | 7,88 | 658 | 10,98 | 1159 | 14,08 | 842 | 17,18 | 584 | 20,28 | 16 |
| 1,72 | 93 | 4,82 | 48 | 7,92 | 657 | 11,01 | 1299 | 14,11 | 883 | 17,21 | 579 | 20,31 | 5 |
| 1,75 | 137 | 4,85 | 20 | 7,95 | 681 | 11,04 | 1555 | 14,14 | 829 | 17,24 | 575 | 20,34 | 7 |
| 1,78 | 86 | 4,88 | 34 | 7,98 | 563 | 11,08 | 1898 | 14,17 | 861 | 17,27 | 601 | 20,37 | 4 |
| 1,81 | 63 | 4,91 | 26 | 8,01 | 571 | 11,11 | 2161 | 14,20 | 843 | 17,30 | 617 | 20,40 | 11 |
| 1,84 | 51 | 4,94 | 34 | 8,04 | 511 | 11,14 | 2210 | 14,24 | 868 | 17,33 | 533 | 20,43 | 18 |
| 1,87 | 17 | 4,97 | 31 | 8,07 | 503 | 11,17 | 1997 | 14,27 | 849 | 17,36 | 591 | 20,46 | 12 |
| 1,90 | 20 | 5,00 | 37 | 8,10 | 728 | 11,20 | 1664 | 14,30 | 888 | 17,40 | 544 | 20,49 | 10 |
| 1,93 | 3 | 5,03 | 43 | 8,13 | 1080 | 11,23 | 1304 | 14,33 | 859 | 17,43 | 549 | 20,52 | 10 |
| 1,96 | 21 | 5,06 | 40 | 8,16 | 1992 | 11,26 | 1164 | 14,36 | 854 | 17,46 | 594 | 20,55 | 3 |
| 2,00 | 30 | 5,09 | 16 | 8,19 | 3502 | 11,29 | 1126 | 14,39 | 846 | 17,49 | 547 | 20,59 | 13 |
| 2,03 | 29 | 5,13 | 53 | 8,22 | 5455 | 11,32 | 1081 | 14,42 | 851 | 17,52 | 567 | 20,62 | 7 |
| 2,06 | 52 | 5,16 | 59 | 8,26 | 6596 | 11,35 | 1068 | 14,45 | 851 | 17,55 | 544 | 20,65 | 14 |
| 2,09 | 41 | 5,19 | 13 | 8,29 | 6533 | 11,39 | 1139 | 14,48 | 808 | 17,58 | 523 | 20,68 | 3 |
| 2,12 | 58 | 5,22 | 20 | 8,32 | 5147 | 11,42 | 1244 | 14,51 | 848 | 17,61 | 557 | 20,71 | 10 |
| 2,15 | 25 | 5,25 | 30 | 8,35 | 3126 | 11,45 | 1319 | 14,55 | 860 | 17,64 | 535 | 20,74 | 5 |
| 2,18 | 27 | 5,28 | 41 | 8,38 | 1690 | 11,48 | 1314 | 14,58 | 873 | 17,67 | 515 | 20,77 | 6 |
| 2,21 | 41 | 5,31 | 29 | 8,41 | 925 | 11,51 | 1358 | 14,61 | 914 | 17,71 | 541 | 20,80 | 16 |
| 2,24 | 52 | 5,34 | 9 | 8,44 | 710 | 11,54 | 1266 | 14,64 | 878 | 17,74 | 539 | 20,83 | 10 |
| 2,27 | 28 | 5,37 | 23 | 8,47 | 624 | 11,57 | 1091 | 14,67 | 825 | 17,77 | 514 | 20,86 | 12 |
| 2,31 | 38 | 5,40 | 32 | 8,50 | 646 | 11,60 | 1067 | 14,70 | 810 | 17,80 | 497 | 20,90 | 5 |
| 2,34 | 5 | 5,44 | 25 | 8,53 | 616 | 11,63 | 987 | 14,73 | 828 | 17,83 | 547 | 20,93 | 10 |
| 2,37 | 11 | 5,47 | 37 | 8,57 | 618 | 11,66 | 1008 | 14,76 | 853 | 17,86 | 566 | 20,96 | 11 |
| 2,40 | 10 | 5,50 | 23 | 8,60 | 660 | 11,70 | 1003 | 14,79 | 859 | 17,89 | 508 | 20,99 | 11 |
| 2,43 | 20 | 5,53 | 52 | 8,63 | 656 | 11,73 | 955 | 14,82 | 825 | 17,92 | 469 | | |
| 2,46 | 35 | 5,56 | 37 | 8,66 | 653 | 11,76 | 951 | 14,86 | 879 | 17,95 | 500 | | |
| 2,49 | 38 | 5,59 | 37 | 8,69 | 694 | 11,79 | 1075 | 14,89 | 828 | 17,98 | 476 | | |
| 2,52 | 49 | 5,62 | 30 | 8,72 | 680 | 11,82 | 1057 | 14,92 | 827 | 18,01 | 522 | | |
| 2,55 | 31 | 5,65 | 35 | 8,75 | 699 | 11,85 | 1028 | 14,95 | 782 | 18,05 | 481 | | |
| 2,58 | 16 | 5,68 | 22 | 8,78 | 770 | 11,88 | 1058 | 14,98 | 805 | 18,08 | 478 | | |
| 2,62 | 23 | 5,71 | 56 | 8,81 | 746 | 11,91 | 1127 | 15,01 | 798 | 18,11 | 494 | | |
| 2,65 | 22 | 5,75 | 31 | 8,84 | 679 | 11,94 | 1042 | 15,04 | 827 | 18,14 | 448 | | |
| 2,68 | 23 | 5,78 | 42 | 8,88 | 658 | 11,97 | 1003 | 15,07 | 762 | 18,17 | 447 | | |
| 2,71 | 37 | 5,81 | 56 | 8,91 | 673 | 12,01 | 1009 | 15,10 | 749 | 18,20 | 455 | | |

(segue) H2O, distanza sorgente rivelatore = 50 cm.

| E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi |
|------------|----------|------------|----------|------------|----------|------------|----------|------------|----------|------------|----------|
| 2,77 | 8 | 5,87 | 57 | 8,97 | 674 | 12,07 | 956 | 15,17 | 770 | 18,26 | 474 |
| 2,80 | 37 | 5,90 | 42 | 9,00 | 668 | 12,10 | 1013 | 15,20 | 726 | 18,29 | 434 |
| 2,83 | 37 | 5,93 | 34 | 9,03 | 747 | 12,13 | 963 | 15,23 | 724 | 18,32 | 478 |
| 2,86 | 53 | 5,96 | 35 | 9,06 | 751 | 12,16 | 1015 | 15,26 | 758 | 18,36 | 425 |
| 2,89 | 82 | 5,99 | 48 | 9,09 | 671 | 12,19 | 996 | 15,29 | 764 | 18,39 | 439 |
| 2,93 | 53 | 6,02 | 28 | 9,12 | 745 | 12,22 | 993 | 15,32 | 688 | 18,42 | 411 |
| 2,96 | 49 | 6,06 | 49 | 9,15 | 703 | 12,25 | 1021 | 15,35 | 780 | 18,45 | 429 |
| 2,99 | 66 | 6,09 | 46 | 9,19 | 780 | 12,28 | 1006 | 15,38 | 745 | 18,48 | 399 |
| 3,02 | 61 | 6,12 | 43 | 9,22 | 786 | 12,31 | 1059 | 15,41 | 772 | 18,51 | 432 |
| 3,05 | 62 | 6,15 | 57 | 9,25 | 794 | 12,35 | 1089 | 15,44 | 760 | 18,54 | 415 |
| 3,08 | 43 | 6,18 | 77 | 9,28 | 866 | 12,38 | 1070 | 15,47 | 727 | 18,57 | 428 |
| 3,11 | 24 | 6,21 | 55 | 9,31 | 1054 | 12,41 | 1085 | 15,51 | 746 | 18,60 | 417 |
| 3,14 | 22 | 6,24 | 85 | 9,34 | 1215 | 12,44 | 1069 | 15,54 | 746 | 18,63 | 433 |
| 3,17 | 33 | 6,27 | 66 | 9,37 | 1557 | 12,47 | 1001 | 15,57 | 729 | 18,67 | 347 |
| 3,20 | 28 | 6,30 | 82 | 9,40 | 2024 | 12,50 | 1008 | 15,60 | 730 | 18,70 | 394 |
| 3,24 | 27 | 6,33 | 77 | 9,43 | 2919 | 12,53 | 988 | 15,63 | 730 | 18,73 | 411 |
| 3,27 | 57 | 6,37 | 74 | 9,46 | 4063 | 12,56 | 1032 | 15,66 | 724 | 18,76 | 388 |
| 3,30 | 46 | 6,40 | 104 | 9,50 | 5305 | 12,59 | 1103 | 15,69 | 697 | 18,79 | 386 |
| 3,33 | 48 | 6,43 | 96 | 9,53 | 6113 | 12,62 | 1115 | 15,72 | 656 | 18,82 | 392 |
| 3,36 | 48 | 6,46 | 71 | 9,56 | 5708 | 12,66 | 1055 | 15,75 | 685 | 18,85 | 373 |
| 3,39 | 23 | 6,49 | 98 | 9,59 | 4478 | 12,69 | 1044 | 15,78 | 688 | 18,88 | 390 |
| 3,42 | 26 | 6,52 | 75 | 9,62 | 3395 | 12,72 | 1095 | 15,82 | 687 | 18,91 | 301 |
| 3,45 | 45 | 6,55 | 103 | 9,65 | 2457 | 12,75 | 1096 | 15,85 | 696 | 18,94 | 329 |
| 3,48 | 31 | 6,58 | 102 | 9,68 | 2188 | 12,78 | 1051 | 15,88 | 686 | 18,97 | 361 |
| 3,51 | 33 | 6,61 | 120 | 9,71 | 2416 | 12,81 | 999 | 15,91 | 674 | 19,01 | 346 |
| 3,55 | 54 | 6,64 | 110 | 9,74 | 2886 | 12,84 | 986 | 15,94 | 728 | 19,04 | 326 |
| 3,58 | 28 | 6,68 | 102 | 9,77 | 3427 | 12,87 | 915 | 15,97 | 687 | 19,07 | 336 |
| 3,61 | 35 | 6,71 | 98 | 9,81 | 3898 | 12,90 | 827 | 16,00 | 710 | 19,10 | 305 |
| 3,64 | 40 | 6,74 | 126 | 9,84 | 3826 | 12,93 | 860 | 16,03 | 693 | 19,13 | 303 |
| 3,67 | 49 | 6,77 | 122 | 9,87 | 3211 | 12,97 | 842 | 16,06 | 679 | 19,16 | 294 |
| 3,70 | 14 | 6,80 | 146 | 9,90 | 2201 | 13,00 | 779 | 16,09 | 667 | 19,19 | 268 |
| 3,73 | 13 | 6,83 | 157 | 9,93 | 1614 | 13,03 | 807 | 16,13 | 696 | 19,22 | 284 |
| 3,76 | 17 | 6,86 | 115 | 9,96 | 1287 | 13,06 | 796 | 16,16 | 704 | 19,25 | 285 |
| 3,79 | 33 | 6,89 | 160 | 9,99 | 1074 | 13,09 | 812 | 16,19 | 658 | 19,28 | 277 |
| 3,82 | 24 | 6,92 | 176 | 10,02 | 1039 | 13,12 | 810 | 16,22 | 660 | 19,32 | 289 |
| 3,86 | 12 | 6,95 | 159 | 10,05 | 1004 | 13,15 | 817 | 16,25 | 676 | 19,35 | 275 |
| 3,89 | 32 | 6,99 | 148 | 10,08 | 965 | 13,18 | 785 | 16,28 | 634 | 19,38 | 232 |
| 3,92 | 30 | 7,02 | 134 | 10,12 | 943 | 13,21 | 814 | 16,31 | 679 | 19,41 | 239 |
| 3,95 | 19 | 7,05 | 153 | 10,15 | 984 | 13,24 | 845 | 16,34 | 695 | 19,44 | 246 |
| 3,98 | 30 | 7,08 | 157 | 10,18 | 909 | 13,28 | 832 | 16,37 | 650 | 19,47 | 257 |
| 4,01 | 20 | 7,11 | 177 | 10,21 | 894 | 13,31 | 802 | 16,40 | 650 | 19,50 | 220 |
| 4,04 | 45 | 7,14 | 186 | 10,24 | 934 | 13,34 | 820 | 16,44 | 644 | 19,53 | 230 |
| 4,07 | 25 | 7,17 | 217 | 10,27 | 923 | 13,37 | 862 | 16,47 | 644 | 19,56 | 208 |

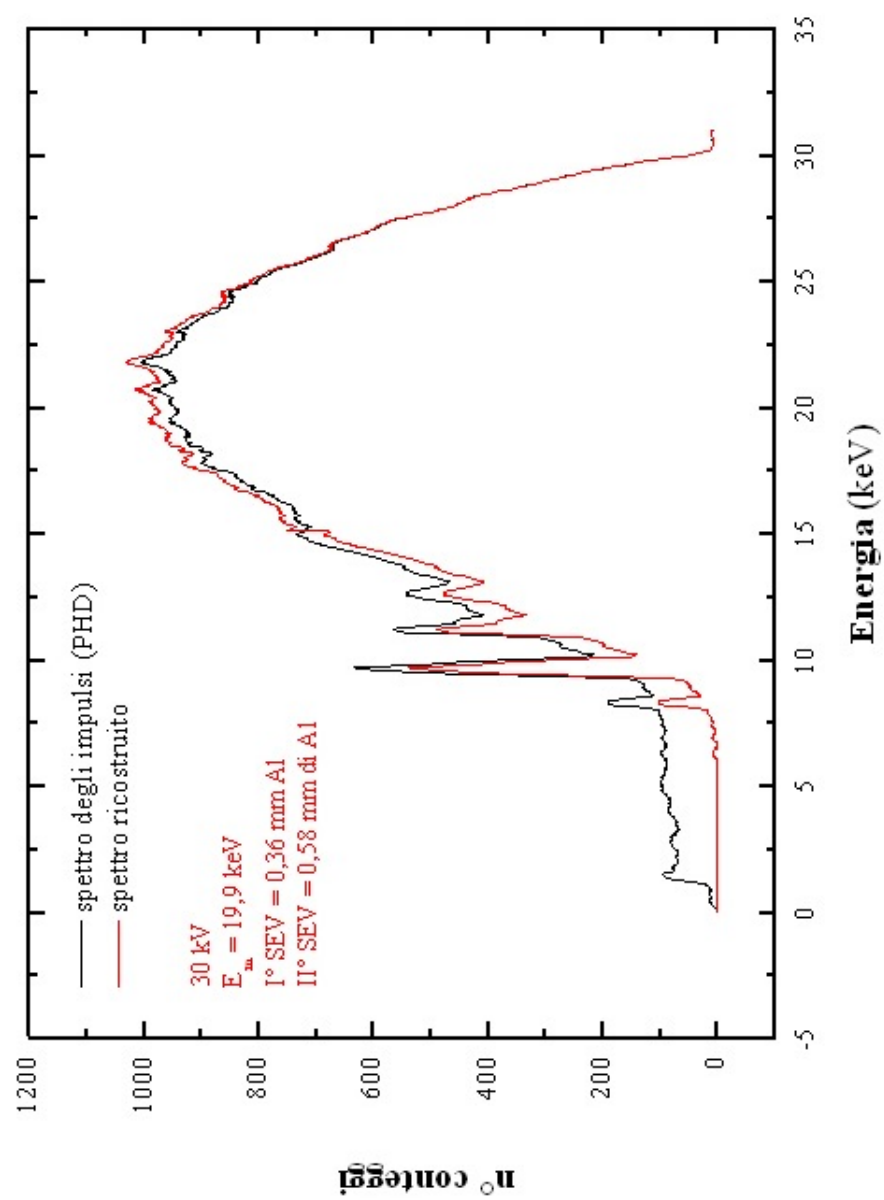


Figura B.13: H_{30} , distanza sorgente rivelatore = 50 cm.

[illegible]

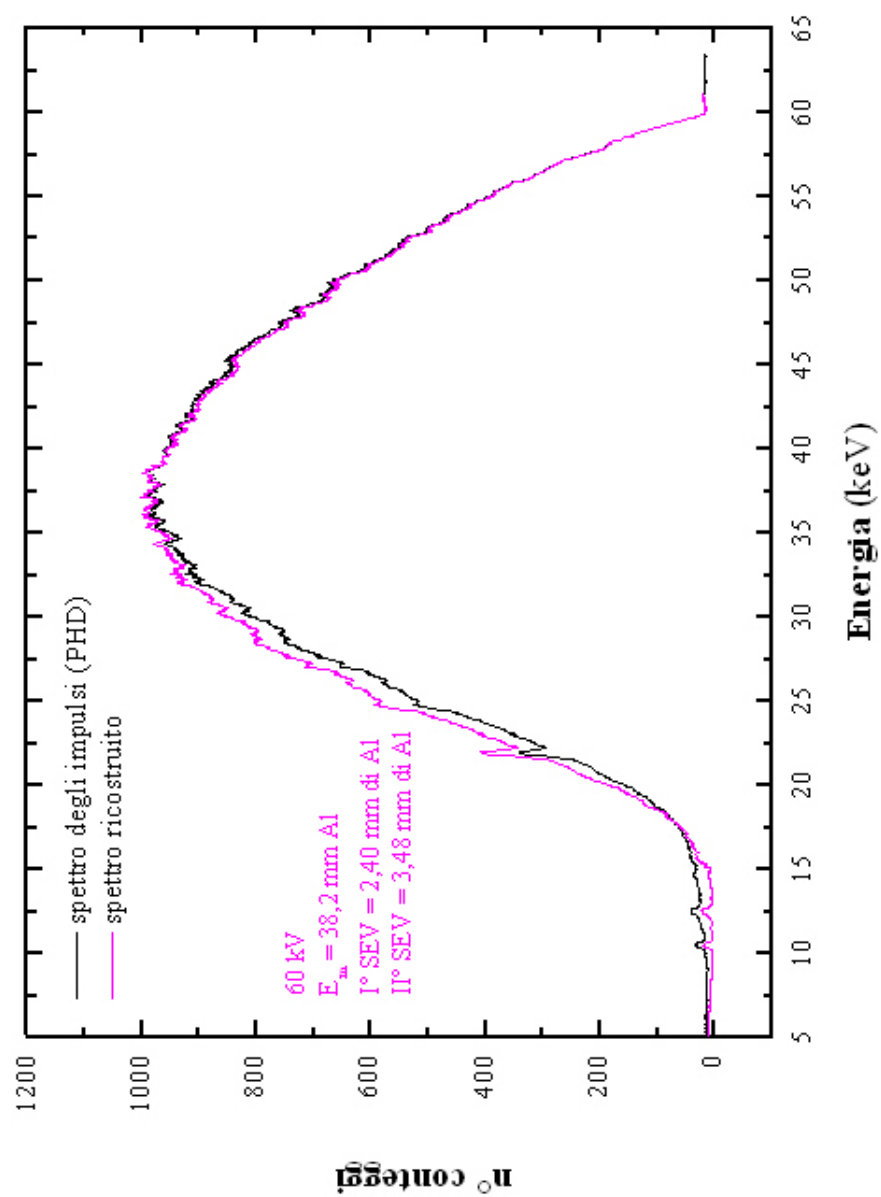


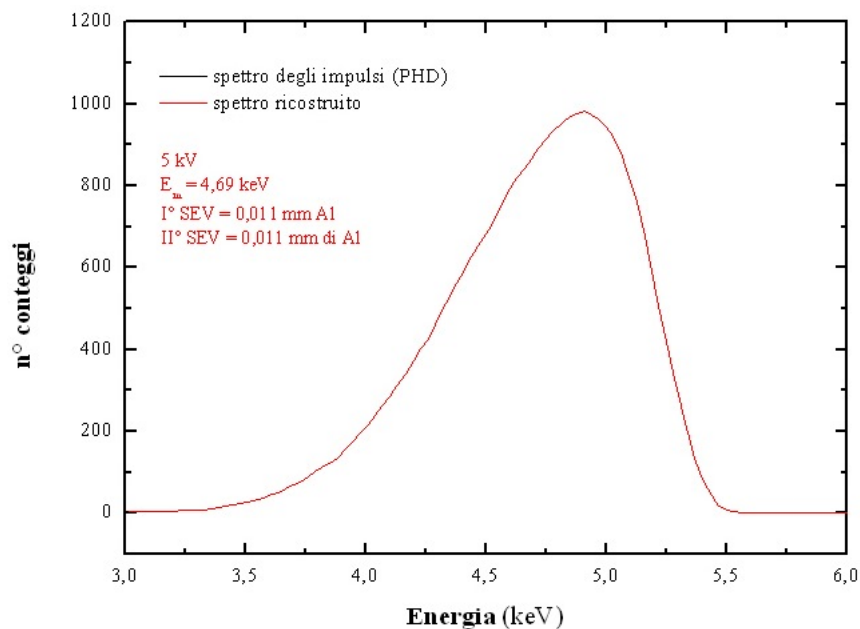
Figura B.14: *H60*, distanza sorgente rivelatore = 50 cm.

| | E_{contig1} | E_{contig2} | E_{contig3} | E_{contig4} | E_{contig5} | E_{contig6} | E_{contig7} | E_{contig8} | E_{contig9} | E_{contig10} | E_{contig11} | E_{contig12} | E_{contig13} | E_{contig14} | E_{contig15} | E_{contig16} | E_{contig17} | E_{contig18} | E_{contig19} | E_{contig20} | E_{contig21} | E_{contig22} | E_{contig23} | E_{contig24} | E_{contig25} | E_{contig26} | E_{contig27} | E_{contig28} | E_{contig29} | E_{contig30} | E_{contig31} | E_{contig32} | E_{contig33} | E_{contig34} | E_{contig35} | E_{contig36} | E_{contig37} | E_{contig38} | E_{contig39} | E_{contig40} | E_{contig41} | E_{contig42} | E_{contig43} | E_{contig44} | E_{contig45} | E_{contig46} | E_{contig47} | E_{contig48} | E_{contig49} | E_{contig50} | E_{contig51} | E_{contig52} | E_{contig53} | E_{contig54} | E_{contig55} | E_{contig56} | E_{contig57} | E_{contig58} | E_{contig59} | E_{contig60} | E_{contig61} | E_{contig62} | E_{contig63} | E_{contig64} | E_{contig65} | E_{contig66} | E_{contig67} | E_{contig68} | E_{contig69} | E_{contig70} | E_{contig71} | E_{contig72} | E_{contig73} | E_{contig74} | E_{contig75} | E_{contig76} | E_{contig77} | E_{contig78} | E_{contig79} | E_{contig80} | E_{contig81} | E_{contig82} | E_{contig83} | E_{contig84} | E_{contig85} | E_{contig86} | E_{contig87} | E_{contig88} | E_{contig89} | E_{contig90} | E_{contig91} | E_{contig92} | E_{contig93} | E_{contig94} | E_{contig95} | E_{contig96} | E_{contig97} | E_{contig98} | E_{contig99} | $E_{\text{contig100}}$ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|
| 2.00 | 4.509 | 9.119 | 13.679 | 18.239 | 22.800 | 27.360 | 31.920 | 36.480 | 41.040 | 45.600 | 50.160 | 54.720 | 59.280 | 63.840 | 68.400 | 72.960 | 77.520 | 82.080 | 86.640 | 91.200 | 95.760 | 100.320 | 104.880 | 109.440 | 114.000 | 118.560 | 123.120 | 127.680 | 132.240 | 136.800 | 141.360 | 145.920 | 150.480 | 155.040 | 159.600 | 164.160 | 168.720 | 173.280 | 177.840 | 182.400 | 186.960 | 191.520 | 196.080 | 200.640 | 205.200 | 209.760 | 214.320 | 218.880 | 223.440 | 228.000 | 232.560 | 237.120 | 241.680 | 246.240 | 250.800 | 255.360 | 259.920 | 264.480 | 269.040 | 273.600 | 278.160 | 282.720 | 287.280 | 291.840 | 296.400 | 300.960 | 305.520 | 310.080 | 314.640 | 319.200 | 323.760 | 328.320 | 332.880 | 337.440 | 342.000 | 346.560 | 351.120 | 355.680 | 360.240 | 364.800 | 369.360 | 373.920 | 378.480 | 383.040 | 387.600 | 392.160 | 396.720 | 401.280 | 405.840 | 410.400 | 414.960 | 419.520 | 424.080 | 428.640 | 433.200 | 437.760 | 442.320 | 446.880 | 451.440 | 456.000 | 460.560 | 465.120 | 469.680 | 474.240 | 478.800 | 483.360 | 487.920 | 492.480 | 497.040 | 501.600 | 506.160 | 510.720 | 515.280 | 519.840 | 524.400 | 528.960 | 533.520 | 538.080 | 542.640 | 547.200 | 551.760 | 556.320 | 560.880 | 565.440 | 570.000 | 574.560 | 579.120 | 583.680 | 588.240 | 592.800 | 597.360 | 601.920 | 606.480 | 611.040 | 615.600 | 620.160 | 624.720 | 629.280 | 633.840 | 638.400 | 642.960 | 647.520 | 652.080 | 656.640 | 661.200 | 665.760 | 670.320 | 674.880 | 679.440 | 684.000 | 688.560 | 693.120 | 697.680 | 702.240 | 706.800 | 711.360 | 715.920 | 720.480 | 725.040 | 729.600 | 734.160 | 738.720 | 743.280 | 747.840 | 752.400 | 756.960 | 761.520 | 766.080 | 770.640 | 775.200 | 779.760 | 784.320 | 788.880 | 793.440 | 798.000 | 802.560 | 807.120 | 811.680 | 816.240 | 820.800 | 825.360 | 829.920 | 834.480 | 839.040 | 843.600 | 848.160 | 852.720 | 857.280 | 861.840 | 866.400 | 870.960 | 875.520 | 880.080 | 884.640 | 889.200 | 893.760 | 898.320 | 902.880 | 907.440 | 912.000 | 916.560 | 921.120 | 925.680 | 930.240 | 934.800 | 939.360 | 943.920 | 948.480 | 953.040 | 957.600 | 962.160 | 966.720 | 971.280 | 975.840 | 980.400 | 984.960 | 989.520 | 994.080 | 998.640 | 1003.200 |

(segue) H60, distanza sorgente rivelatore = 50 cm.

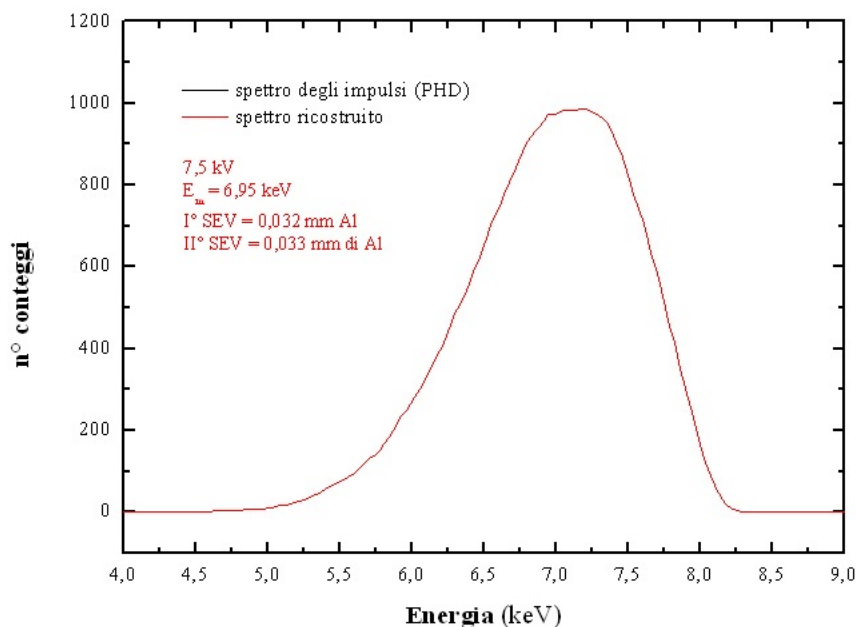
[illegible]

B.1.4 Spettro 5 kV e 7,5 kV.



| E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi |
|---------|----------|---------|----------|---------|----------|---------|----------|
| 3,02 | 3 | 3,95 | 175 | 4,88 | 977 | 5,81 | 2 |
| 3,05 | 3 | 3,98 | 197 | 4,91 | 981 | 5,84 | 2 |
| 3,08 | 3 | 4,01 | 217 | 4,94 | 972 | 5,87 | 2 |
| 3,11 | 4 | 4,04 | 238 | 4,97 | 965 | 5,90 | 1 |
| 3,14 | 4 | 4,07 | 262 | 5,00 | 943 | 5,93 | 2 |
| 3,17 | 4 | 4,10 | 285 | 5,03 | 920 | 5,96 | 1 |
| 3,20 | 5 | 4,13 | 310 | 5,06 | 881 | 5,99 | 1 |
| 3,24 | 6 | 4,17 | 342 | 5,09 | 830 | 6,02 | 1 |
| 3,27 | 6 | 4,20 | 371 | 5,13 | 761 | | |
| 3,30 | 8 | 4,23 | 401 | 5,16 | 677 | | |
| 3,33 | 9 | 4,26 | 426 | 5,19 | 591 | | |
| 3,36 | 11 | 4,29 | 461 | 5,22 | 506 | | |
| 3,39 | 13 | 4,32 | 496 | 5,25 | 419 | | |
| 3,42 | 16 | 4,35 | 530 | 5,28 | 342 | | |
| 3,45 | 19 | 4,38 | 563 | 5,31 | 262 | | |
| 3,48 | 23 | 4,41 | 596 | 5,34 | 197 | | |
| 3,51 | 28 | 4,44 | 628 | 5,37 | 134 | | |
| 3,55 | 34 | 4,48 | 663 | 5,40 | 82 | | |
| 3,58 | 38 | 4,51 | 692 | 5,44 | 43 | | |
| 3,61 | 45 | 4,54 | 722 | 5,47 | 18 | | |
| 3,64 | 51 | 4,57 | 756 | 5,50 | 8 | | |
| 3,67 | 59 | 4,60 | 792 | 5,53 | 3 | | |
| 3,70 | 68 | 4,63 | 820 | 5,56 | 2 | | |
| 3,73 | 77 | 4,66 | 843 | 5,59 | 1 | | |
| 3,76 | 90 | 4,69 | 865 | 5,62 | 2 | | |
| 3,79 | 101 | 4,72 | 890 | 5,65 | 2 | | |
| 3,82 | 112 | 4,75 | 913 | 5,68 | 2 | | |
| 3,86 | 125 | 4,78 | 934 | 5,71 | 2 | | |
| 3,89 | 139 | 4,82 | 954 | 5,75 | 2 | | |
| 3,92 | 159 | 4,85 | 970 | 5,78 | 2 | | |

Figura B.15: Spettro 5 kV, distanza sorgente-rivelatore = 50 cm.



| E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi |
|---------|----------|---------|----------|---------|----------|---------|----------|---------|----------|---------|----------|
| 3,02 | 1 | 3,95 | 1 | 4,88 | 6 | 5,81 | 166 | 6,74 | 857 | 7,67 | 625 |
| 3,05 | 1 | 3,98 | 1 | 4,91 | 7 | 5,84 | 182 | 6,77 | 881 | 7,70 | 585 |
| 3,08 | 1 | 4,01 | 1 | 4,94 | 8 | 5,87 | 201 | 6,80 | 906 | 7,73 | 541 |
| 3,11 | 2 | 4,04 | 1 | 4,97 | 9 | 5,90 | 217 | 6,83 | 921 | 7,76 | 501 |
| 3,14 | 2 | 4,07 | 1 | 5,00 | 10 | 5,93 | 235 | 6,86 | 933 | 7,79 | 456 |
| 3,17 | 2 | 4,10 | 1 | 5,03 | 12 | 5,96 | 247 | 6,89 | 945 | 7,82 | 414 |
| 3,20 | 2 | 4,13 | 1 | 5,06 | 13 | 5,99 | 264 | 6,92 | 958 | 7,85 | 367 |
| 3,24 | 2 | 4,17 | 1 | 5,09 | 16 | 6,02 | 282 | 6,95 | 973 | 7,88 | 326 |
| 3,27 | 2 | 4,20 | 1 | 5,13 | 17 | 6,06 | 302 | 6,99 | 974 | 7,92 | 278 |
| 3,30 | 1 | 4,23 | 1 | 5,16 | 19 | 6,09 | 322 | 7,02 | 975 | 7,95 | 233 |
| 3,33 | 1 | 4,26 | 1 | 5,19 | 22 | 6,12 | 342 | 7,05 | 982 | 7,98 | 193 |
| 3,36 | 1 | 4,29 | 1 | 5,22 | 26 | 6,15 | 364 | 7,08 | 984 | 8,01 | 154 |
| 3,39 | 2 | 4,32 | 1 | 5,25 | 30 | 6,18 | 387 | 7,11 | 984 | 8,04 | 120 |
| 3,42 | 2 | 4,35 | 1 | 5,28 | 34 | 6,21 | 405 | 7,14 | 983 | 8,07 | 90 |
| 3,45 | 2 | 4,38 | 1 | 5,31 | 40 | 6,24 | 430 | 7,17 | 985 | 8,10 | 65 |
| 3,48 | 1 | 4,41 | 1 | 5,34 | 44 | 6,27 | 456 | 7,20 | 985 | 8,13 | 46 |
| 3,51 | 1 | 4,44 | 1 | 5,37 | 50 | 6,30 | 487 | 7,23 | 981 | 8,16 | 29 |
| 3,55 | 1 | 4,48 | 1 | 5,40 | 55 | 6,33 | 507 | 7,26 | 976 | 8,19 | 17 |
| 3,58 | 1 | 4,51 | 1 | 5,44 | 62 | 6,37 | 532 | 7,30 | 968 | 8,22 | 9 |
| 3,61 | 1 | 4,54 | 2 | 5,47 | 69 | 6,40 | 560 | 7,33 | 960 | 8,26 | 4 |
| 3,64 | 1 | 4,57 | 2 | 5,50 | 75 | 6,43 | 589 | 7,36 | 949 | 8,29 | 1 |
| 3,67 | 1 | 4,60 | 2 | 5,53 | 80 | 6,46 | 616 | 7,39 | 932 | 8,32 | 0 |
| 3,70 | 2 | 4,63 | 2 | 5,56 | 85 | 6,49 | 644 | 7,42 | 905 | 8,35 | 0 |
| 3,73 | 2 | 4,66 | 3 | 5,59 | 93 | 6,52 | 671 | 7,45 | 878 | 8,38 | 0 |
| 3,76 | 1 | 4,69 | 3 | 5,62 | 102 | 6,55 | 703 | 7,48 | 846 | 8,41 | 0 |
| 3,79 | 1 | 4,72 | 3 | 5,65 | 111 | 6,58 | 729 | 7,51 | 814 | 8,44 | 0 |
| 3,82 | 1 | 4,75 | 4 | 5,68 | 122 | 6,61 | 749 | 7,54 | 777 | 8,47 | 0 |
| 3,86 | 1 | 4,78 | 4 | 5,71 | 131 | 6,64 | 776 | 7,57 | 742 | 8,50 | 0 |
| 3,89 | 1 | 4,82 | 5 | 5,75 | 141 | 6,68 | 808 | 7,61 | 706 | 8,53 | 0 |
| 3,92 | 1 | 4,85 | 6 | 5,78 | 152 | 6,71 | 832 | 7,64 | 663 | 8,57 | 0 |

Figura B.16: Spettro 7,5 kV, distanza sorgente-rivelatore = 50 cm.

B.2 Distanza sorgente - rivelatore = 200 cm.

B.2.1 Serie L

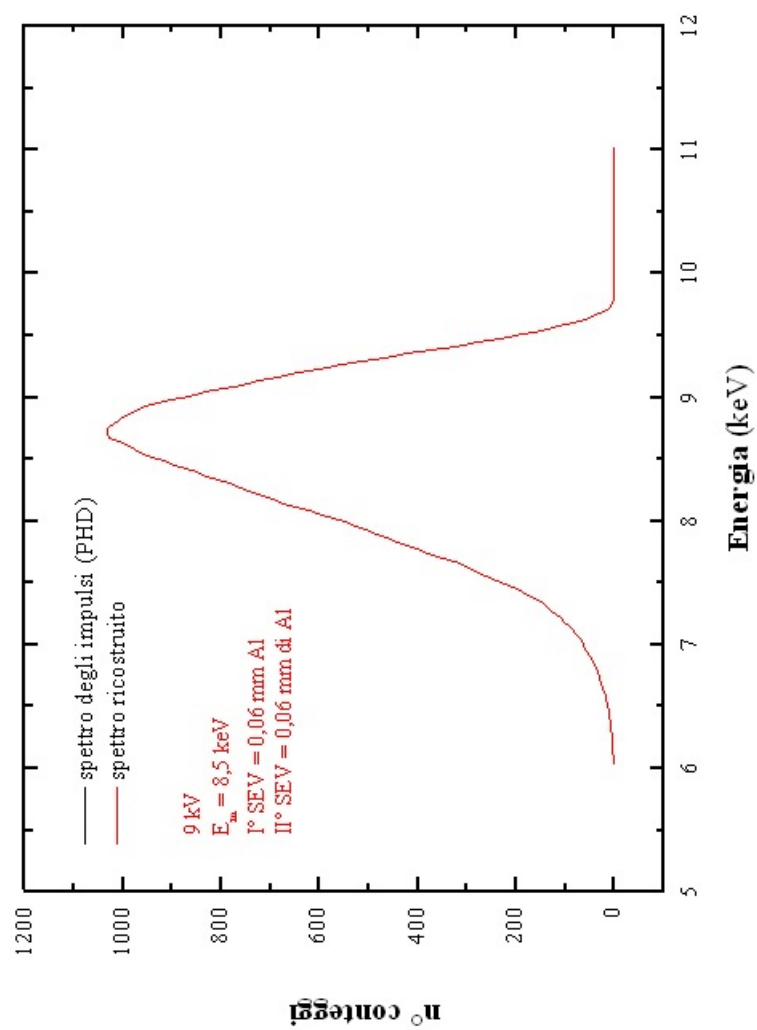


Figura B.17: *L20, distanza sorgente rivelatore = 200 cm.*

| E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi |
|---------|----------|---------|----------|---------|----------|
| 6,02 | 1 | 7,88 | 364 | 9,74 | 4 |
| 6,06 | 1 | 7,92 | 382 | 9,77 | 2 |
| 6,09 | 1 | 7,95 | 398 | 9,81 | 1 |
| 6,12 | 1 | 7,98 | 418 | 9,84 | 1 |
| 6,15 | 1 | 8,01 | 437 | 9,87 | 1 |
| 6,18 | 2 | 8,04 | 456 | 9,90 | 1 |
| 6,21 | 2 | 8,07 | 477 | 9,93 | 1 |
| 6,24 | 2 | 8,10 | 497 | 9,96 | 1 |
| 6,27 | 3 | 8,13 | 519 | 9,99 | 1 |
| 6,30 | 3 | 8,16 | 539 | 10,02 | 1 |
| 6,33 | 4 | 8,19 | 554 | 10,05 | 1 |
| 6,37 | 4 | 8,22 | 573 | 10,08 | 1 |
| 6,40 | 5 | 8,26 | 594 | 10,12 | 1 |
| 6,43 | 6 | 8,29 | 614 | 10,15 | 0 |
| 6,46 | 7 | 8,32 | 633 | 10,18 | 1 |
| 6,49 | 8 | 8,35 | 652 | 10,21 | 0 |
| 6,52 | 9 | 8,38 | 671 | 10,24 | 0 |
| 6,55 | 10 | 8,41 | 691 | 10,27 | 0 |
| 6,58 | 11 | 8,44 | 709 | 10,30 | 0 |
| 6,61 | 13 | 8,47 | 729 | 10,33 | 0 |
| 6,64 | 15 | 8,50 | 748 | 10,36 | 1 |
| 6,68 | 16 | 8,53 | 768 | 10,39 | 1 |
| 6,71 | 18 | 8,57 | 782 | 10,42 | 1 |
| 6,74 | 19 | 8,60 | 796 | 10,46 | 1 |
| 6,77 | 21 | 8,63 | 811 | 10,49 | 1 |
| 6,80 | 24 | 8,66 | 828 | 10,52 | 1 |
| 6,83 | 26 | 8,69 | 832 | 10,55 | 1 |
| 6,86 | 29 | 8,72 | 835 | 10,58 | 1 |
| 6,89 | 31 | 8,75 | 833 | 10,61 | 1 |
| 6,92 | 35 | 8,78 | 825 | 10,64 | 1 |
| 6,95 | 39 | 8,81 | 816 | 10,67 | 1 |
| 6,99 | 42 | 8,84 | 809 | 10,70 | 1 |
| 7,02 | 45 | 8,88 | 796 | 10,73 | 1 |
| 7,05 | 49 | 8,91 | 782 | 10,77 | 1 |
| 7,08 | 54 | 8,94 | 762 | 10,80 | 1 |
| 7,11 | 58 | 8,97 | 739 | 10,83 | 1 |
| 7,14 | 63 | 9,00 | 709 | 10,86 | 1 |
| 7,17 | 69 | 9,03 | 684 | 10,89 | 1 |
| 7,20 | 75 | 9,06 | 654 | 10,92 | 0 |
| 7,23 | 82 | 9,09 | 624 | 10,95 | 0 |
| 7,26 | 89 | 9,12 | 598 | 10,98 | 0 |
| 7,30 | 95 | 9,15 | 567 | 11,01 | 0 |
| 7,33 | 103 | 9,19 | 531 | | |
| 7,36 | 113 | 9,22 | 496 | | |
| 7,39 | 125 | 9,25 | 459 | | |
| 7,42 | 135 | 9,28 | 423 | | |
| 7,45 | 147 | 9,31 | 386 | | |
| 7,48 | 158 | 9,34 | 350 | | |
| 7,51 | 173 | 9,37 | 309 | | |
| 7,54 | 189 | 9,40 | 269 | | |
| 7,57 | 201 | 9,43 | 230 | | |
| 7,61 | 215 | 9,46 | 192 | | |
| 7,64 | 229 | 9,50 | 155 | | |
| 7,67 | 248 | 9,53 | 122 | | |
| 7,70 | 265 | 9,56 | 94 | | |
| 7,73 | 279 | 9,59 | 70 | | |
| 7,76 | 298 | 9,62 | 50 | | |

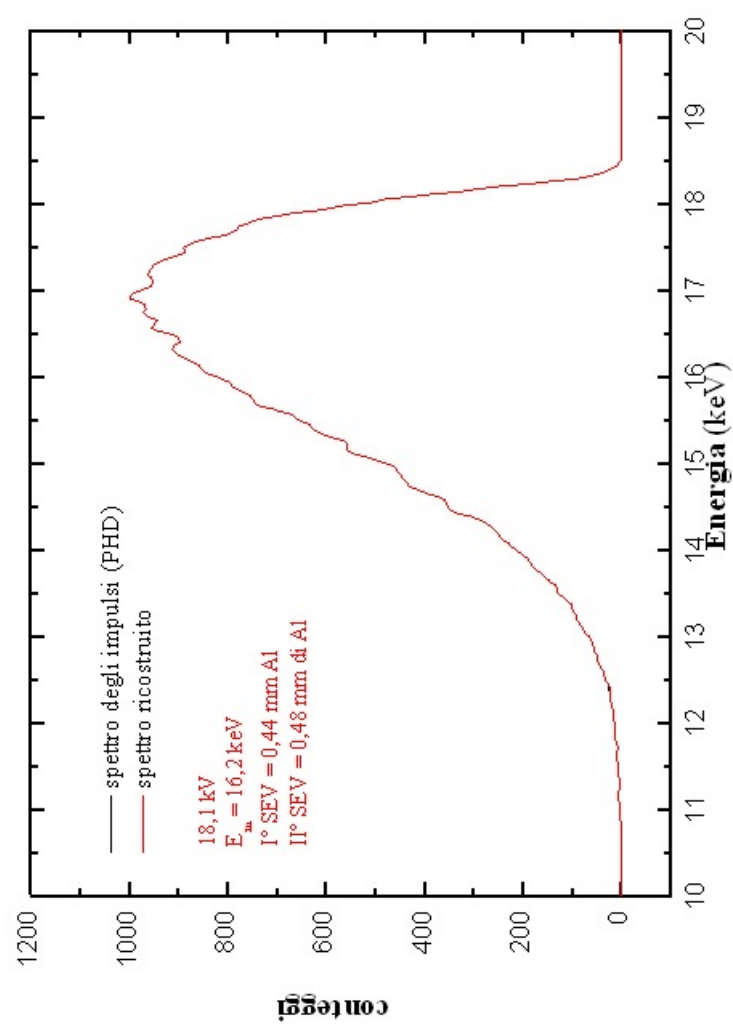


Figura B.18: *L20*, distanza sorgente rivelatore = 200 cm.

[illegible]

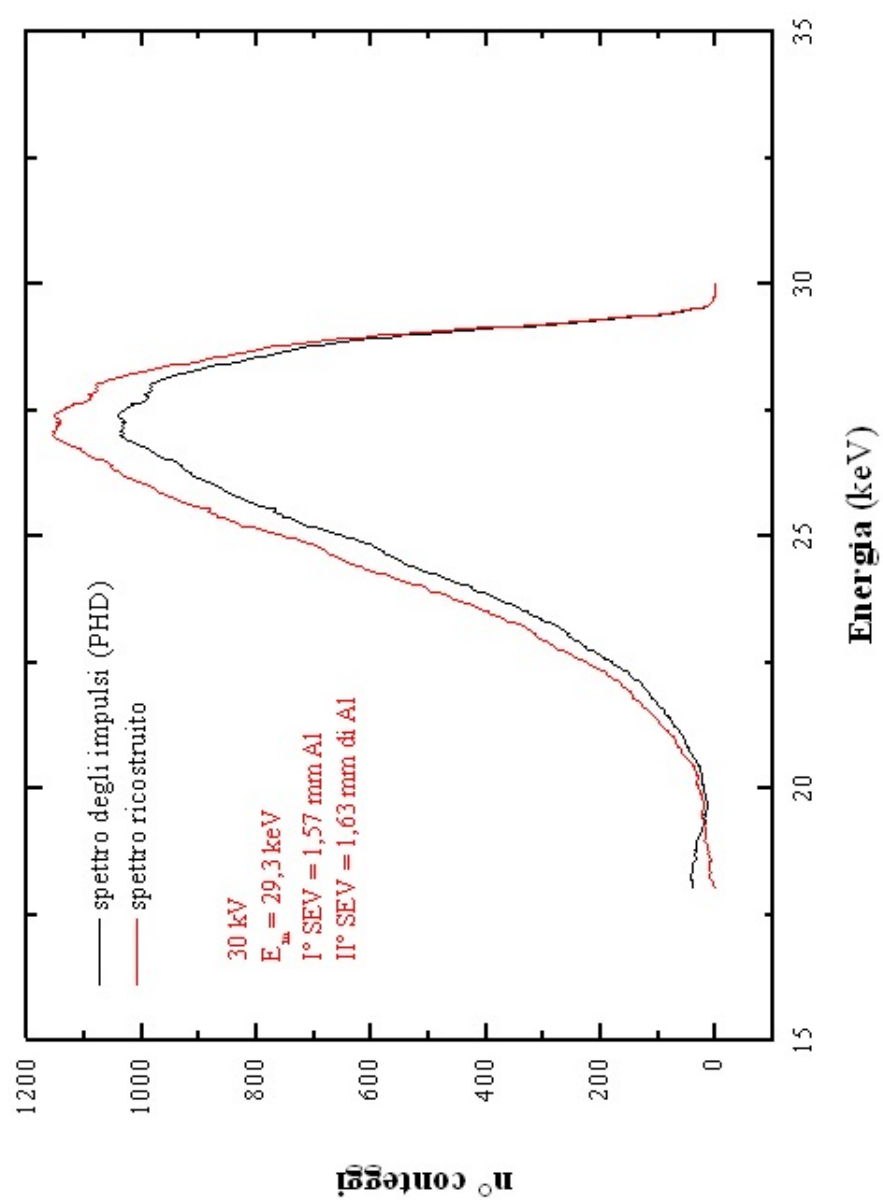


Figura B.19: *L30, distanza sorgente rivelatore = 200 cm.*

| E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi |
|---------|----------|---------|----------|---------|----------|---------|----------|
| 18,01 | 1 | 21,11 | 84 | 24,21 | 577 | 27,30 | 1146 |
| 18,05 | 3 | 21,14 | 88 | 24,24 | 587 | 27,34 | 1154 |
| 18,08 | 4 | 21,17 | 91 | 24,27 | 597 | 27,37 | 1152 |
| 18,11 | 5 | 21,20 | 93 | 24,30 | 606 | 27,40 | 1149 |
| 18,14 | 6 | 21,24 | 97 | 24,33 | 613 | 27,43 | 1144 |
| 18,17 | 8 | 21,27 | 98 | 24,36 | 618 | 27,46 | 1142 |
| 18,20 | 9 | 21,30 | 100 | 24,39 | 625 | 27,49 | 1134 |
| 18,23 | 10 | 21,33 | 102 | 24,43 | 634 | 27,52 | 1131 |
| 18,26 | 10 | 21,36 | 104 | 24,46 | 643 | 27,55 | 1118 |
| 18,29 | 8 | 21,39 | 105 | 24,49 | 646 | 27,58 | 1121 |
| 18,32 | 9 | 21,42 | 107 | 24,52 | 656 | 27,61 | 1107 |
| 18,36 | 9 | 21,45 | 113 | 24,55 | 661 | 27,65 | 1099 |
| 18,39 | 9 | 21,48 | 114 | 24,58 | 665 | 27,68 | 1092 |
| 18,42 | 11 | 21,51 | 117 | 24,61 | 670 | 27,71 | 1089 |
| 18,45 | 11 | 21,55 | 120 | 24,64 | 675 | 27,74 | 1088 |
| 18,48 | 12 | 21,58 | 122 | 24,67 | 678 | 27,77 | 1094 |
| 18,51 | 10 | 21,61 | 127 | 24,70 | 682 | 27,80 | 1090 |
| 18,54 | 8 | 21,64 | 129 | 24,73 | 691 | 27,83 | 1085 |
| 18,57 | 8 | 21,67 | 132 | 24,77 | 697 | 27,86 | 1077 |
| 18,60 | 9 | 21,70 | 136 | 24,80 | 702 | 27,89 | 1081 |
| 18,63 | 11 | 21,73 | 140 | 24,83 | 709 | 27,92 | 1077 |
| 18,67 | 12 | 21,76 | 143 | 24,86 | 718 | 27,95 | 1079 |
| 18,70 | 11 | 21,79 | 143 | 24,89 | 725 | 27,99 | 1076 |
| 18,73 | 14 | 21,82 | 145 | 24,92 | 733 | 28,02 | 1070 |
| 18,76 | 13 | 21,86 | 147 | 24,95 | 745 | 28,05 | 1065 |
| 18,79 | 14 | 21,89 | 149 | 24,98 | 750 | 28,08 | 1054 |
| 18,82 | 13 | 21,92 | 154 | 25,01 | 761 | 28,11 | 1042 |
| 18,85 | 14 | 21,95 | 156 | 25,04 | 776 | 28,14 | 1029 |
| 18,88 | 17 | 21,98 | 158 | 25,08 | 786 | 28,17 | 1023 |
| 18,91 | 18 | 22,01 | 163 | 25,11 | 792 | 28,20 | 1015 |
| 18,94 | 19 | 22,04 | 164 | 25,14 | 807 | 28,23 | 1000 |
| 18,97 | 18 | 22,07 | 168 | 25,17 | 821 | 28,26 | 986 |
| 19,01 | 16 | 22,10 | 170 | 25,20 | 829 | 28,30 | 972 |
| 19,04 | 18 | 22,13 | 176 | 25,23 | 833 | 28,33 | 960 |
| 19,07 | 17 | 22,16 | 181 | 25,26 | 843 | 28,36 | 944 |
| 19,10 | 16 | 22,20 | 184 | 25,29 | 849 | 28,39 | 927 |
| 19,13 | 16 | 22,23 | 188 | 25,32 | 858 | 28,42 | 909 |
| 19,16 | 18 | 22,26 | 190 | 25,35 | 868 | 28,45 | 895 |
| 19,19 | 18 | 22,29 | 194 | 25,39 | 868 | 28,48 | 885 |
| 19,22 | 19 | 22,32 | 200 | 25,42 | 873 | 28,51 | 870 |
| 19,25 | 18 | 22,35 | 204 | 25,45 | 884 | 28,54 | 860 |
| 19,28 | 18 | 22,38 | 210 | 25,48 | 882 | 28,57 | 844 |
| 19,32 | 19 | 22,41 | 216 | 25,51 | 882 | 28,61 | 829 |
| 19,35 | 22 | 22,44 | 224 | 25,54 | 887 | 28,64 | 811 |
| 19,38 | 23 | 22,47 | 227 | 25,57 | 908 | 28,67 | 793 |
| 19,41 | 22 | 22,51 | 232 | 25,60 | 917 | 28,70 | 783 |
| 19,44 | 24 | 22,54 | 239 | 25,63 | 926 | 28,73 | 766 |
| 19,47 | 24 | 22,57 | 242 | 25,66 | 934 | 28,76 | 750 |
| 19,50 | 23 | 22,60 | 247 | 25,69 | 940 | 28,79 | 728 |
| 19,53 | 22 | 22,63 | 252 | 25,73 | 948 | 28,82 | 703 |
| 19,56 | 21 | 22,66 | 258 | 25,76 | 951 | 28,85 | 678 |
| 19,59 | 21 | 22,69 | 264 | 25,79 | 957 | 28,88 | 648 |
| 19,63 | 21 | 22,72 | 272 | 25,82 | 966 | 28,91 | 617 |
| 19,66 | 22 | 22,75 | 279 | 25,85 | 972 | 28,95 | 582 |
| 19,69 | 21 | 22,78 | 281 | 25,88 | 977 | 28,98 | 551 |
| 19,72 | 20 | 22,82 | 285 | 25,91 | 977 | 29,01 | 517 |
| 19,75 | 22 | 22,85 | 291 | 25,94 | 981 | 29,04 | 473 |

(serie) L30, distanza sorgente rivelatore = 200 cm.

| E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi |
|---------|----------|---------|----------|---------|----------|---------|----------|
| 19,81 | 24 | 22,91 | 300 | 26,00 | 995 | 29,10 | 399 |
| 19,84 | 24 | 22,94 | 304 | 26,04 | 1006 | 29,13 | 355 |
| 19,87 | 25 | 22,97 | 309 | 26,07 | 1015 | 29,16 | 317 |
| 19,90 | 26 | 23,00 | 315 | 26,10 | 1019 | 29,19 | 278 |
| 19,94 | 28 | 23,03 | 313 | 26,13 | 1024 | 29,22 | 240 |
| 19,97 | 29 | 23,06 | 315 | 26,16 | 1027 | 29,26 | 206 |
| 20,00 | 30 | 23,09 | 319 | 26,19 | 1034 | 29,29 | 173 |
| 20,03 | 30 | 23,12 | 323 | 26,22 | 1037 | 29,32 | 141 |
| 20,06 | 32 | 23,16 | 330 | 26,25 | 1043 | 29,35 | 113 |
| 20,09 | 32 | 23,19 | 333 | 26,28 | 1046 | 29,38 | 90 |
| 20,12 | 32 | 23,22 | 343 | 26,31 | 1050 | 29,41 | 68 |
| 20,15 | 31 | 23,25 | 350 | 26,35 | 1053 | 29,44 | 51 |
| 20,18 | 30 | 23,28 | 358 | 26,38 | 1052 | 29,47 | 39 |
| 20,21 | 30 | 23,31 | 367 | 26,41 | 1056 | 29,50 | 27 |
| 20,24 | 32 | 23,34 | 369 | 26,44 | 1060 | 29,53 | 18 |
| 20,28 | 32 | 23,37 | 379 | 26,47 | 1068 | 29,56 | 12 |
| 20,31 | 34 | 23,40 | 386 | 26,50 | 1077 | 29,60 | 7 |
| 20,34 | 35 | 23,43 | 392 | 26,53 | 1085 | 29,63 | 5 |
| 20,37 | 37 | 23,47 | 396 | 26,56 | 1094 | 29,66 | 4 |
| 20,40 | 38 | 23,50 | 403 | 26,59 | 1097 | 29,69 | 3 |
| 20,43 | 40 | 23,53 | 409 | 26,62 | 1099 | 29,72 | 2 |
| 20,46 | 41 | 23,56 | 414 | 26,65 | 1104 | 29,75 | 2 |
| 20,49 | 44 | 23,59 | 422 | 26,69 | 1108 | 29,78 | 1 |
| 20,52 | 45 | 23,62 | 431 | 26,72 | 1111 | 29,81 | 1 |
| 20,55 | 49 | 23,65 | 436 | 26,75 | 1121 | 29,84 | 1 |
| 20,59 | 53 | 23,68 | 444 | 26,78 | 1130 | 29,87 | 1 |
| 20,62 | 55 | 23,71 | 454 | 26,81 | 1133 | 29,91 | 1 |
| 20,65 | 55 | 23,74 | 459 | 26,84 | 1139 | 29,94 | 1 |
| 20,68 | 59 | 23,78 | 465 | 26,87 | 1143 | 29,97 | 1 |
| 20,71 | 60 | 23,81 | 475 | 26,90 | 1147 | 30,00 | 1 |
| 20,74 | 61 | 23,84 | 482 | 26,93 | 1151 | | |
| 20,77 | 63 | 23,87 | 493 | 26,96 | 1156 | | |
| 20,80 | 65 | 23,90 | 498 | 27,00 | 1151 | | |
| 20,83 | 66 | 23,93 | 504 | 27,03 | 1154 | | |
| 20,86 | 69 | 23,96 | 507 | 27,06 | 1155 | | |
| 20,90 | 69 | 23,99 | 515 | 27,09 | 1150 | | |
| 20,93 | 70 | 24,02 | 526 | 27,12 | 1148 | | |
| 20,96 | 73 | 24,05 | 535 | 27,15 | 1151 | | |
| 20,99 | 74 | 24,08 | 545 | 27,18 | 1144 | | |
| 21,02 | 75 | 24,12 | 552 | 27,21 | 1148 | | |
| 21,05 | 78 | 24,15 | 564 | 27,24 | 1142 | | |
| 21,08 | 83 | 24,18 | 570 | 27,27 | 1144 | | |

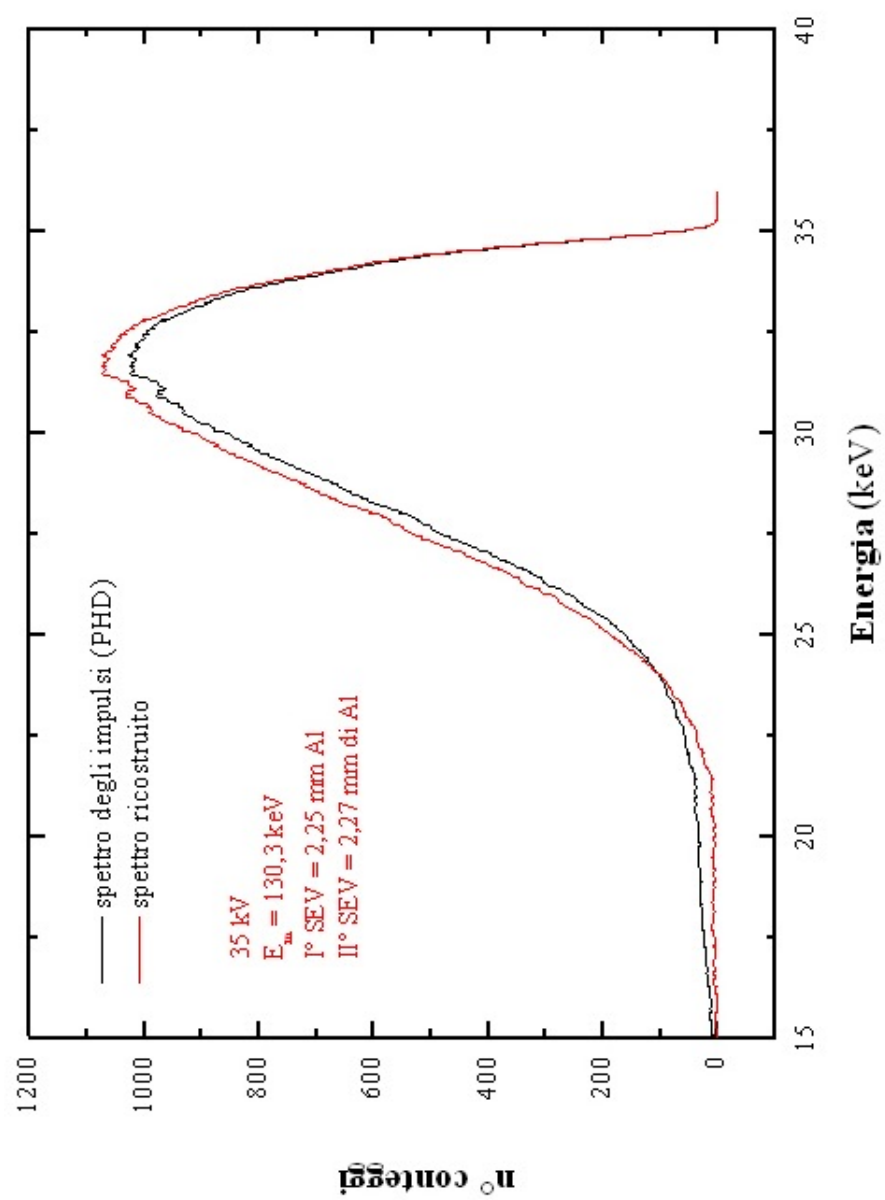


Figura B.20: *L35*, distanza sorgente rivelatore = 200 cm.

| E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi |
|------------|----------|------------|----------|------------|----------|------------|----------|------------|----------|------------|----------|------------|----------|------------|----------|
| 14,02 | 0 | 17,12 | 5 | 20,21 | 4 | 23,31 | 66 | 26,41 | 352 | 29,50 | 857 | 32,60 | 1022 | 35,69 | 1 |
| 14,05 | 0 | 17,15 | 5 | 20,24 | 4 | 23,34 | 67 | 26,44 | 359 | 29,53 | 859 | 32,63 | 1019 | 35,72 | 1 |
| 14,08 | 0 | 17,18 | 5 | 20,28 | 5 | 23,37 | 71 | 26,47 | 363 | 29,56 | 866 | 32,66 | 1016 | 35,76 | 1 |
| 14,11 | 0 | 17,21 | 5 | 20,31 | 5 | 23,40 | 71 | 26,50 | 368 | 29,60 | 867 | 32,69 | 1010 | 35,79 | 1 |
| 14,14 | 0 | 17,24 | 6 | 20,34 | 6 | 23,43 | 75 | 26,53 | 368 | 29,63 | 872 | 32,72 | 1006 | 35,82 | 1 |
| 14,17 | 1 | 17,27 | 6 | 20,37 | 8 | 23,47 | 78 | 26,56 | 375 | 29,66 | 878 | 32,75 | 999 | 35,85 | 2 |
| 14,20 | 0 | 17,30 | 6 | 20,40 | 9 | 23,50 | 80 | 26,59 | 381 | 29,69 | 870 | 32,78 | 1002 | 35,88 | 2 |
| 14,24 | 1 | 17,33 | 5 | 20,43 | 8 | 23,53 | 80 | 26,62 | 383 | 29,72 | 880 | 32,81 | 996 | 35,91 | 2 |
| 14,27 | 1 | 17,36 | 5 | 20,46 | 9 | 23,56 | 80 | 26,65 | 391 | 29,75 | 882 | 32,85 | 983 | 35,94 | 2 |
| 14,30 | 3 | 17,40 | 5 | 20,49 | 9 | 23,59 | 80 | 26,69 | 395 | 29,78 | 889 | 32,88 | 977 | 35,97 | 2 |
| 14,33 | 2 | 17,43 | 5 | 20,52 | 10 | 23,62 | 81 | 26,72 | 401 | 29,81 | 894 | 32,91 | 971 | 36,00 | 2 |
| 14,36 | 0 | 17,46 | 5 | 20,55 | 10 | 23,65 | 83 | 26,75 | 406 | 29,84 | 896 | 32,94 | 963 | | |
| 14,39 | 0 | 17,49 | 5 | 20,59 | 11 | 23,68 | 85 | 26,78 | 413 | 29,87 | 901 | 32,97 | 959 | | |
| 14,42 | 0 | 17,52 | 6 | 20,62 | 11 | 23,71 | 86 | 26,81 | 414 | 29,91 | 905 | 33,00 | 956 | | |
| 14,45 | 2 | 17,55 | 6 | 20,65 | 13 | 23,74 | 88 | 26,84 | 419 | 29,94 | 909 | 33,03 | 952 | | |
| 14,48 | 3 | 17,58 | 6 | 20,68 | 11 | 23,78 | 88 | 26,87 | 426 | 29,97 | 914 | 33,06 | 946 | | |
| 14,51 | 2 | 17,61 | 7 | 20,71 | 10 | 23,81 | 89 | 26,90 | 431 | 30,00 | 920 | 33,09 | 940 | | |
| 14,55 | 3 | 17,64 | 7 | 20,74 | 8 | 23,84 | 92 | 26,93 | 436 | 30,03 | 935 | 33,12 | 932 | | |
| 14,58 | 2 | 17,67 | 9 | 20,77 | 8 | 23,87 | 94 | 26,96 | 443 | 30,06 | 934 | 33,16 | 919 | | |
| 14,61 | 1 | 17,71 | 10 | 20,80 | 8 | 23,90 | 96 | 27,00 | 442 | 30,09 | 934 | 33,19 | 920 | | |
| 14,64 | 1 | 17,74 | 9 | 20,83 | 10 | 23,93 | 98 | 27,03 | 452 | 30,12 | 939 | 33,22 | 912 | | |
| 14,67 | 2 | 17,77 | 9 | 20,86 | 10 | 23,96 | 99 | 27,06 | 459 | 30,15 | 940 | 33,25 | 910 | | |
| 14,70 | 4 | 17,80 | 9 | 20,90 | 10 | 23,99 | 100 | 27,09 | 464 | 30,18 | 946 | 33,28 | 904 | | |
| 14,73 | 3 | 17,83 | 9 | 20,93 | 10 | 24,02 | 105 | 27,12 | 467 | 30,21 | 955 | 33,31 | 897 | | |
| 14,76 | 3 | 17,86 | 9 | 20,96 | 9 | 24,05 | 107 | 27,15 | 474 | 30,25 | 962 | 33,34 | 891 | | |
| 14,79 | 3 | 17,89 | 9 | 20,99 | 8 | 24,08 | 111 | 27,18 | 481 | 30,28 | 967 | 33,37 | 883 | | |
| 14,82 | 2 | 17,92 | 8 | 21,02 | 10 | 24,12 | 112 | 27,21 | 486 | 30,31 | 967 | 33,40 | 876 | | |
| 14,86 | 1 | 17,95 | 7 | 21,05 | 11 | 24,15 | 114 | 27,24 | 491 | 30,34 | 973 | 33,43 | 869 | | |
| 14,89 | 0 | 17,98 | 8 | 21,08 | 13 | 24,18 | 114 | 27,27 | 495 | 30,37 | 973 | 33,46 | 859 | | |
| 14,92 | 2 | 18,01 | 6 | 21,11 | 11 | 24,21 | 118 | 27,30 | 503 | 30,40 | 976 | 33,50 | 855 | | |
| 14,95 | 1 | 18,05 | 6 | 21,14 | 12 | 24,24 | 121 | 27,34 | 515 | 30,43 | 983 | 33,53 | 844 | | |
| 14,98 | 1 | 18,08 | 6 | 21,17 | 10 | 24,27 | 124 | 27,37 | 516 | 30,46 | 990 | 33,56 | 838 | | |
| 15,01 | 1 | 18,11 | 5 | 21,20 | 10 | 24,30 | 127 | 27,40 | 516 | 30,49 | 991 | 33,59 | 824 | | |
| 15,04 | 1 | 18,14 | 7 | 21,24 | 12 | 24,33 | 130 | 27,43 | 524 | 30,52 | 985 | 33,62 | 813 | | |
| 15,07 | 2 | 18,17 | 7 | 21,27 | 11 | 24,36 | 128 | 27,46 | 531 | 30,56 | 989 | 33,65 | 806 | | |
| 15,10 | 1 | 18,20 | 8 | 21,30 | 11 | 24,39 | 130 | 27,49 | 537 | 30,59 | 988 | 33,68 | 794 | | |
| 15,13 | 1 | 18,23 | 7 | 21,33 | 11 | 24,43 | 132 | 27,52 | 538 | 30,62 | 995 | 33,71 | 785 | | |
| 15,17 | 2 | 18,26 | 8 | 21,36 | 11 | 24,46 | 136 | 27,55 | 542 | 30,65 | 994 | 33,74 | 772 | | |
| 15,20 | 2 | 18,29 | 7 | 21,39 | 9 | 24,49 | 140 | 27,58 | 547 | 30,68 | 997 | 33,77 | 763 | | |
| 15,23 | 3 | 18,32 | 8 | 21,42 | 8 | 24,52 | 143 | 27,61 | 550 | 30,71 | 1006 | 33,81 | 748 | | |
| 15,26 | 4 | 18,36 | 9 | 21,45 | 11 | 24,55 | 145 | 27,65 | 549 | 30,74 | 1015 | 33,84 | 735 | | |
| 15,29 | 5 | 18,39 | 8 | 21,48 | 11 | 24,58 | 148 | 27,68 | 555 | 30,77 | 1013 | 33,87 | 725 | | |
| 15,32 | 4 | 18,42 | 7 | 21,51 | 12 | 24,61 | 152 | 27,71 | 562 | 30,80 | 1016 | 33,90 | 712 | | |
| 15,35 | 4 | 18,45 | 8 | 21,55 | 13 | 24,64 | 157 | 27,74 | 568 | 30,83 | 1019 | 33,93 | 703 | | |
| 15,38 | 3 | 18,48 | 7 | 21,58 | 14 | 24,67 | 161 | 27,77 | 570 | 30,86 | 1032 | 33,96 | 694 | | |
| 15,41 | 4 | 18,51 | 7 | 21,61 | 15 | 24,70 | 163 | 27,80 | 572 | 30,90 | 1033 | 33,99 | 677 | | |
| 15,44 | 5 | 18,54 | 8 | 21,64 | 16 | 24,73 | 165 | 27,83 | 573 | 30,93 | 1031 | 34,02 | 666 | | |
| 15,47 | 5 | 18,57 | 8 | 21,67 | 17 | 24,77 | 168 | 27,86 | 582 | 30,96 | 1024 | 34,05 | 651 | | |
| 15,51 | 4 | 18,60 | 7 | 21,70 | 19 | 24,80 | 170 | 27,89 | 584 | 30,99 | 1030 | 34,08 | 639 | | |
| 15,54 | 5 | 18,63 | 8 | 21,73 | 21 | 24,83 | 171 | 27,92 | 586 | 31,02 | 1029 | 34,11 | 632 | | |
| 15,57 | 3 | 18,67 | 6 | 21,76 | 23 | 24,86 | 180 | 27,95 | 595 | 31,05 | 1021 | 34,15 | 622 | | |
| 15,60 | 3 | 18,70 | 5 | 21,79 | 23 | 24,89 | 180 | 27,99 | 606 | 31,08 | 1016 | 34,18 | 611 | | |
| 15,63 | 1 | 18,73 | 6 | 21,82 | 23 | 24,92 | 181 | 28,02 | 605 | 31,11 | 1021 | 34,21 | 596 | | |
| 15,66 | 2 | 18,76 | 8 | 21,86 | 23 | 24,95 | 186 | 28,05 | 611 | 31,14 | 1026 | 34,24 | 581 | | |
| 15,69 | 2 | 18,79 | 7 | 21,89 | 23 | 24,98 | 186 | 28,08 | 621 | 31,17 | 1029 | 34,27 | 566 | | |
| 15,72 | 2 | 18,82 | 6 | 21,92 | 23 | 25,01 | 189 | 28,11 | 625 | 31,21 | 1029 | 34,30 | 552 | | |

(serie) L35, distanza sorgente rivelatore = 200 cm.

| E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi |
|------------|----------|------------|----------|------------|----------|------------|----------|------------|----------|------------|----------|------------|----------|------------|----------|
| 15,75 | 0 | 18,85 | 6 | 21,95 | 26 | 25,04 | 194 | 28,14 | 631 | 31,24 | 1029 | 34,33 | 538 | | |
| 15,78 | 0 | 18,88 | 3 | 21,98 | 27 | 25,08 | 197 | 28,17 | 641 | 31,27 | 1039 | 34,36 | 523 | | |
| 15,82 | 0 | 18,91 | 5 | 22,01 | 27 | 25,11 | 199 | 28,20 | 645 | 31,30 | 1045 | 34,39 | 507 | | |
| 15,85 | 0 | 18,94 | 5 | 22,04 | 25 | 25,14 | 203 | 28,23 | 650 | 31,33 | 1047 | 34,42 | 489 | | |
| 15,88 | 0 | 18,97 | 5 | 22,07 | 27 | 25,17 | 205 | 28,26 | 658 | 31,36 | 1056 | 34,46 | 464 | | |
| 15,91 | 1 | 19,01 | 7 | 22,10 | 28 | 25,20 | 205 | 28,30 | 665 | 31,39 | 1064 | 34,49 | 447 | | |
| 15,94 | 1 | 19,04 | 8 | 22,13 | 28 | 25,23 | 211 | 28,33 | 666 | 31,42 | 1072 | 34,52 | 423 | | |
| 15,97 | 2 | 19,07 | 7 | 22,16 | 31 | 25,26 | 214 | 28,36 | 676 | 31,45 | 1075 | 34,55 | 402 | | |
| 16,00 | 2 | 19,10 | 6 | 22,20 | 32 | 25,29 | 216 | 28,39 | 675 | 31,48 | 1071 | 34,58 | 382 | | |
| 16,03 | 0 | 19,13 | 5 | 22,23 | 32 | 25,32 | 218 | 28,42 | 682 | 31,51 | 1070 | 34,61 | 357 | | |
| 16,06 | 2 | 19,16 | 5 | 22,26 | 34 | 25,35 | 218 | 28,45 | 690 | 31,55 | 1068 | 34,64 | 331 | | |
| 16,09 | 4 | 19,19 | 7 | 22,29 | 35 | 25,39 | 223 | 28,48 | 694 | 31,58 | 1072 | 34,67 | 308 | | |
| 16,13 | 3 | 19,22 | 8 | 22,32 | 35 | 25,42 | 230 | 28,51 | 696 | 31,61 | 1068 | 34,70 | 281 | | |
| 16,16 | 4 | 19,25 | 7 | 22,35 | 35 | 25,45 | 234 | 28,54 | 700 | 31,64 | 1073 | 34,73 | 254 | | |
| 16,19 | 4 | 19,28 | 8 | 22,38 | 35 | 25,48 | 237 | 28,57 | 707 | 31,67 | 1071 | 34,76 | 229 | | |
| 16,22 | 3 | 19,32 | 8 | 22,41 | 35 | 25,51 | 243 | 28,61 | 712 | 31,70 | 1070 | 34,80 | 204 | | |
| 16,25 | 2 | 19,35 | 7 | 22,44 | 35 | 25,54 | 245 | 28,64 | 714 | 31,73 | 1070 | 34,83 | 174 | | |
| 16,28 | 5 | 19,38 | 8 | 22,47 | 36 | 25,57 | 250 | 28,67 | 720 | 31,76 | 1064 | 34,86 | 151 | | |
| 16,31 | 6 | 19,41 | 8 | 22,51 | 37 | 25,60 | 259 | 28,70 | 720 | 31,79 | 1064 | 34,89 | 127 | | |
| 16,34 | 6 | 19,44 | 9 | 22,54 | 37 | 25,63 | 258 | 28,73 | 727 | 31,82 | 1062 | 34,92 | 104 | | |
| 16,37 | 7 | 19,47 | 9 | 22,57 | 38 | 25,66 | 261 | 28,76 | 729 | 31,86 | 1070 | 34,95 | 85 | | |
| 16,40 | 6 | 19,50 | 8 | 22,60 | 38 | 25,69 | 268 | 28,79 | 737 | 31,89 | 1074 | 34,98 | 66 | | |
| 16,44 | 5 | 19,53 | 7 | 22,63 | 39 | 25,73 | 271 | 28,82 | 743 | 31,92 | 1069 | 35,01 | 48 | | |
| 16,47 | 6 | 19,56 | 6 | 22,66 | 40 | 25,76 | 273 | 28,85 | 747 | 31,95 | 1068 | 35,04 | 36 | | |
| 16,50 | 5 | 19,59 | 6 | 22,69 | 41 | 25,79 | 276 | 28,88 | 753 | 31,98 | 1064 | 35,07 | 25 | | |
| 16,53 | 5 | 19,63 | 6 | 22,72 | 44 | 25,82 | 278 | 28,91 | 758 | 32,01 | 1061 | 35,11 | 17 | | |
| 16,56 | 7 | 19,66 | 6 | 22,75 | 46 | 25,85 | 279 | 28,95 | 762 | 32,04 | 1055 | 35,14 | 11 | | |
| 16,59 | 7 | 19,69 | 6 | 22,78 | 47 | 25,88 | 282 | 28,98 | 768 | 32,07 | 1052 | 35,17 | 8 | | |
| 16,62 | 6 | 19,72 | 4 | 22,82 | 48 | 25,91 | 283 | 29,01 | 773 | 32,10 | 1058 | 35,20 | 4 | | |
| 16,65 | 5 | 19,75 | 5 | 22,85 | 48 | 25,94 | 285 | 29,04 | 780 | 32,13 | 1056 | 35,23 | 3 | | |
| 16,68 | 5 | 19,78 | 3 | 22,88 | 51 | 25,97 | 292 | 29,07 | 789 | 32,16 | 1058 | 35,26 | 2 | | |
| 16,71 | 5 | 19,81 | 4 | 22,91 | 53 | 26,00 | 300 | 29,10 | 792 | 32,20 | 1056 | 35,29 | 1 | | |
| 16,74 | 5 | 19,84 | 4 | 22,94 | 56 | 26,04 | 306 | 29,13 | 793 | 32,23 | 1049 | 35,32 | 1 | | |
| 16,78 | 6 | 19,87 | 6 | 22,97 | 56 | 26,07 | 310 | 29,16 | 799 | 32,26 | 1047 | 35,35 | 1 | | |
| 16,81 | 7 | 19,90 | 6 | 23,00 | 57 | 26,10 | 312 | 29,19 | 803 | 32,29 | 1045 | 35,38 | 1 | | |
| 16,84 | 7 | 19,94 | 7 | 23,03 | 57 | 26,13 | 318 | 29,22 | 807 | 32,32 | 1040 | 35,41 | 1 | | |
| 16,87 | 6 | 19,97 | 6 | 23,06 | 58 | 26,16 | 322 | 29,26 | 817 | 32,35 | 1043 | 35,45 | 1 | | |
| 16,90 | 6 | 20,00 | 5 | 23,09 | 58 | 26,19 | 332 | 29,29 | 822 | 32,38 | 1043 | 35,48 | 2 | | |
| 16,93 | 6 | 20,03 | 3 | 23,12 | 58 | 26,22 | 336 | 29,32 | 824 | 32,41 | 1041 | 35,51 | 1 | | |
| 16,96 | 5 | 20,06 | 5 | 23,16 | 61 | 26,25 | 340 | 29,35 | 832 | 32,44 | 1031 | 35,54 | 1 | | |
| 16,99 | 5 | 20,09 | 6 | 23,19 | 63 | 26,28 | 343 | 29,38 | 837 | 32,47 | 1034 | 35,57 | 1 | | |
| 17,02 | 4 | 20,12 | 7 | 23,22 | 63 | 26,31 | 344 | 29,41 | 841 | 32,51 | 1033 | 35,60 | 1 | | |
| 17,05 | 5 | 20,15 | 6 | 23,25 | 63 | 26,35 | 347 | 29,44 | 842 | 32,54 | 1023 | 35,63 | 1 | | |
| 17,09 | 4 | 20,18 | 6 | 23,28 | 64 | 26,38 | 348 | 29,47 | 850 | 32,57 | 1020 | 35,66 | 1 | | |

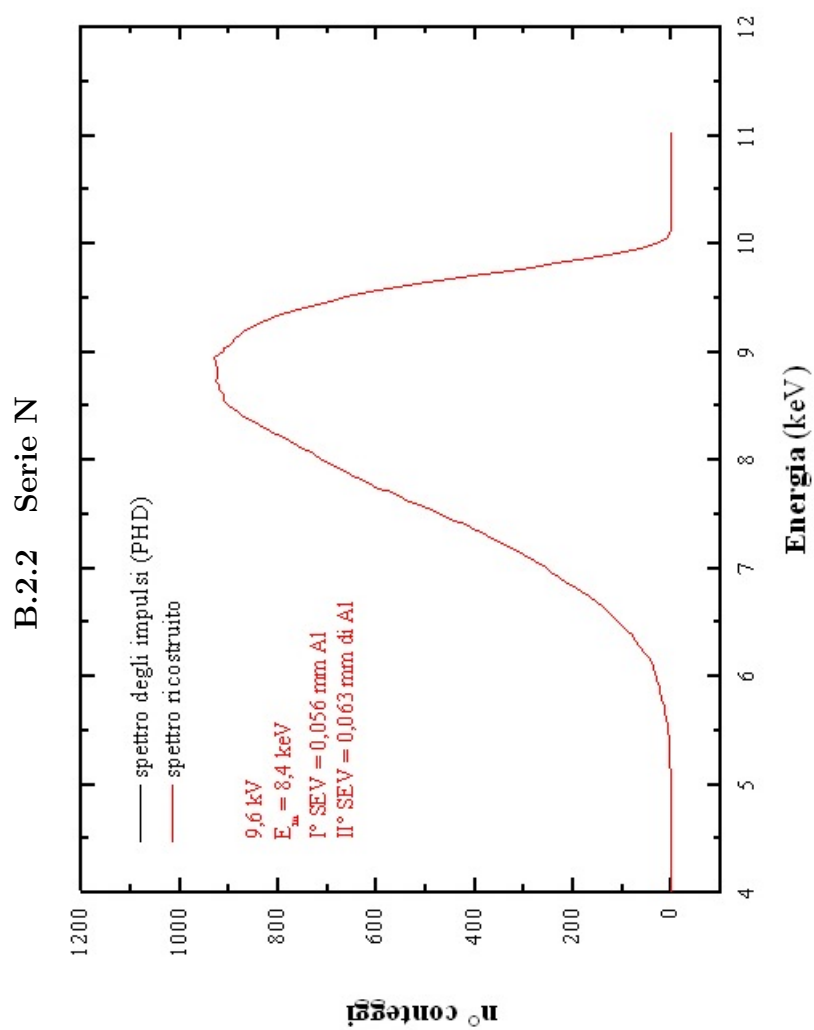
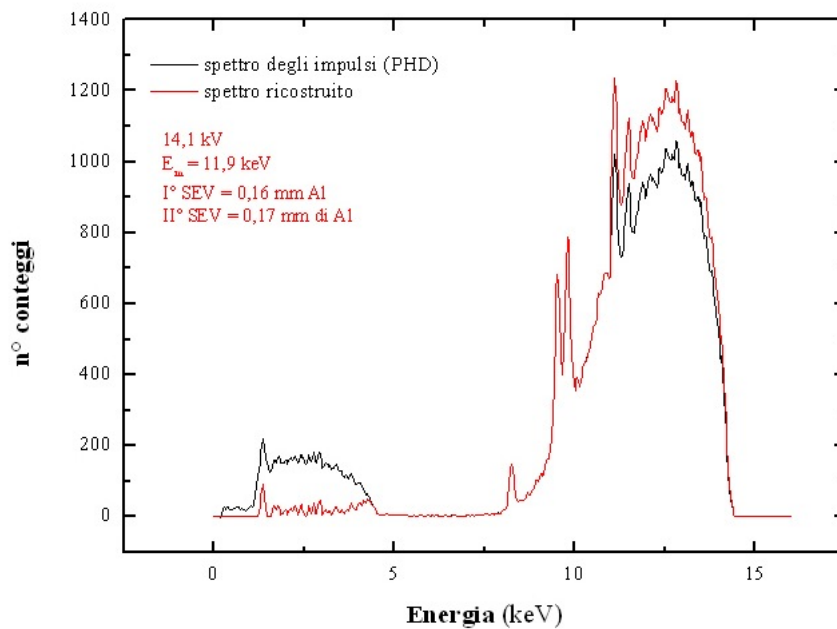


Figura B.21: *N10*, distanza sorgente rivelatore = 200 cm.

| E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi |
|---------|----------|---------|----------|---------|----------|---------|----------|
| 4,01 | 0 | 5,87 | 12 | 7,73 | 441 | 9,59 | 464 |
| 4,04 | 0 | 5,90 | 13 | 7,76 | 453 | 9,62 | 443 |
| 4,07 | 0 | 5,93 | 14 | 7,79 | 465 | 9,65 | 407 |
| 4,10 | 0 | 5,96 | 15 | 7,82 | 479 | 9,68 | 368 |
| 4,13 | 0 | 5,99 | 16 | 7,85 | 490 | 9,71 | 329 |
| 4,17 | 0 | 6,02 | 18 | 7,88 | 498 | 9,74 | 285 |
| 4,20 | 0 | 6,06 | 19 | 7,92 | 512 | 9,77 | 244 |
| 4,23 | 0 | 6,09 | 21 | 7,95 | 522 | 9,81 | 203 |
| 4,26 | 0 | 6,12 | 22 | 7,98 | 535 | 9,84 | 163 |
| 4,29 | 0 | 6,15 | 25 | 8,01 | 547 | 9,87 | 128 |
| 4,32 | 0 | 6,18 | 27 | 8,04 | 556 | 9,90 | 96 |
| 4,35 | 0 | 6,21 | 31 | 8,07 | 567 | 9,93 | 68 |
| 4,38 | 0 | 6,24 | 34 | 8,10 | 577 | 9,96 | 46 |
| 4,41 | 0 | 6,27 | 37 | 8,13 | 591 | 9,99 | 28 |
| 4,44 | 0 | 6,30 | 40 | 8,16 | 601 | 10,02 | 17 |
| 4,48 | 0 | 6,33 | 43 | 8,19 | 610 | 10,05 | 8 |
| 4,51 | 0 | 6,37 | 47 | 8,22 | 625 | 10,08 | 4 |
| 4,54 | 0 | 6,40 | 52 | 8,26 | 638 | 10,12 | 2 |
| 4,57 | 0 | 6,43 | 56 | 8,29 | 647 | 10,15 | 1 |
| 4,60 | 0 | 6,46 | 60 | 8,32 | 658 | 10,18 | 1 |
| 4,63 | 0 | 6,49 | 65 | 8,35 | 668 | 10,21 | 1 |
| 4,66 | 0 | 6,52 | 69 | 8,38 | 681 | 10,24 | 1 |
| 4,69 | 0 | 6,55 | 74 | 8,41 | 691 | 10,27 | 1 |
| 4,72 | 0 | 6,58 | 78 | 8,44 | 700 | 10,30 | 1 |
| 4,75 | 0 | 6,61 | 83 | 8,47 | 709 | 10,33 | 1 |
| 4,78 | 0 | 6,64 | 89 | 8,50 | 719 | 10,36 | 1 |
| 4,82 | 0 | 6,68 | 96 | 8,53 | 727 | 10,39 | 1 |
| 4,85 | 1 | 6,71 | 104 | 8,57 | 730 | 10,42 | 1 |
| 4,88 | 1 | 6,74 | 109 | 8,60 | 730 | 10,46 | 0 |
| 4,91 | 1 | 6,77 | 117 | 8,63 | 738 | 10,49 | 0 |
| 4,94 | 1 | 6,80 | 125 | 8,66 | 742 | 10,52 | 1 |
| 4,97 | 1 | 6,83 | 132 | 8,69 | 744 | 10,55 | 1 |
| 5,00 | 1 | 6,86 | 141 | 8,72 | 750 | 10,58 | 0 |
| 5,03 | 1 | 6,89 | 147 | 8,75 | 749 | 10,61 | 1 |
| 5,06 | 1 | 6,92 | 154 | 8,78 | 749 | 10,64 | 1 |
| 5,09 | 1 | 6,95 | 163 | 8,81 | 751 | 10,67 | 1 |
| 5,13 | 1 | 6,99 | 170 | 8,84 | 751 | 10,70 | 1 |
| 5,16 | 1 | 7,02 | 178 | 8,88 | 755 | 10,73 | 1 |
| 5,19 | 1 | 7,05 | 187 | 8,91 | 756 | 10,77 | 1 |
| 5,22 | 1 | 7,08 | 194 | 8,94 | 759 | 10,80 | 1 |
| 5,25 | 1 | 7,11 | 203 | 8,97 | 753 | 10,83 | 1 |
| 5,28 | 1 | 7,14 | 212 | 9,00 | 748 | 10,86 | 1 |
| 5,31 | 1 | 7,17 | 223 | 9,03 | 748 | 10,89 | 1 |
| 5,34 | 2 | 7,20 | 232 | 9,06 | 738 | 10,92 | 1 |
| 5,37 | 2 | 7,23 | 243 | 9,09 | 734 | 10,95 | 1 |
| 5,40 | 2 | 7,26 | 255 | 9,12 | 731 | 10,98 | 1 |
| 5,44 | 2 | 7,30 | 265 | 9,15 | 723 | 11,01 | 1 |
| 5,47 | 2 | 7,33 | 277 | 9,19 | 717 | | |
| 5,50 | 3 | 7,36 | 288 | 9,22 | 704 | | |
| 5,53 | 3 | 7,39 | 297 | 9,25 | 696 | | |
| 5,56 | 4 | 7,42 | 313 | 9,28 | 682 | | |
| 5,59 | 5 | 7,45 | 324 | 9,31 | 672 | | |
| 5,62 | 5 | 7,48 | 335 | 9,34 | 657 | | |
| 5,65 | 6 | 7,51 | 347 | 9,37 | 638 | | |
| 5,68 | 6 | 7,54 | 359 | 9,40 | 619 | | |
| 5,71 | 7 | 7,57 | 371 | 9,43 | 598 | | |
| 5,75 | 8 | 7,61 | 387 | 9,46 | 573 | | |



| E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi |
|---------|----------|---------|----------|---------|----------|---------|----------|---------|----------|
| 7,02 | 1 | 8,88 | 115 | 10,73 | 590 | 12,59 | 1002 | 14,45 | 57 |
| 7,05 | 1 | 8,91 | 114 | 10,77 | 620 | 12,62 | 1027 | 14,48 | 45 |
| 7,08 | 3 | 8,94 | 113 | 10,80 | 659 | 12,66 | 978 | 14,51 | 33 |
| 7,11 | 3 | 8,97 | 110 | 10,83 | 689 | 12,69 | 982 | 14,55 | 20 |
| 7,14 | 3 | 9,00 | 116 | 10,86 | 682 | 12,72 | 1009 | 14,58 | 12 |
| 7,17 | 2 | 9,03 | 128 | 10,89 | 680 | 12,75 | 1007 | 14,61 | 8 |
| 7,20 | 2 | 9,06 | 144 | 10,92 | 668 | 12,78 | 977 | 14,64 | 5 |
| 7,23 | 4 | 9,09 | 151 | 10,95 | 661 | 12,81 | 941 | 14,67 | 4 |
| 7,26 | 7 | 9,12 | 141 | 10,98 | 658 | 12,84 | 915 | 14,70 | 5 |
| 7,30 | 8 | 9,15 | 138 | 11,01 | 676 | 12,87 | 884 | 14,73 | 5 |
| 7,33 | 8 | 9,19 | 152 | 11,04 | 735 | 12,90 | 852 | 14,76 | 2 |
| 7,36 | 9 | 9,22 | 169 | 11,08 | 822 | 12,93 | 842 | 14,79 | 1 |
| 7,39 | 10 | 9,25 | 184 | 11,11 | 926 | 12,97 | 784 | 14,82 | 0 |
| 7,42 | 10 | 9,28 | 180 | 11,14 | 993 | 13,00 | 748 | 14,86 | 0 |
| 7,45 | 7 | 9,31 | 187 | 11,17 | 992 | 13,03 | 694 | 14,89 | 1 |
| 7,48 | 7 | 9,34 | 202 | 11,20 | 929 | 13,06 | 700 | 14,92 | 1 |
| 7,51 | 7 | 9,37 | 239 | 11,23 | 854 | 13,09 | 688 | 14,95 | 1 |
| 7,54 | 6 | 9,40 | 257 | 11,26 | 801 | 13,12 | 692 | 14,98 | 1 |
| 7,57 | 6 | 9,43 | 306 | 11,29 | 768 | 13,15 | 689 | 15,01 | 2 |
| 7,61 | 7 | 9,46 | 378 | 11,32 | 744 | 13,18 | 676 | | |
| 7,64 | 8 | 9,50 | 524 | 11,35 | 741 | 13,21 | 681 | | |
| 7,67 | 8 | 9,53 | 692 | 11,39 | 747 | 13,24 | 664 | | |
| 7,70 | 10 | 9,56 | 766 | 11,42 | 778 | 13,28 | 658 | | |
| 7,73 | 15 | 9,59 | 720 | 11,45 | 824 | 13,31 | 667 | | |
| 7,76 | 17 | 9,62 | 627 | 11,48 | 858 | 13,34 | 685 | | |
| 7,79 | 18 | 9,65 | 541 | 11,51 | 854 | 13,37 | 663 | | |
| 7,82 | 18 | 9,68 | 445 | 11,54 | 857 | 13,40 | 639 | | |
| 7,85 | 20 | 9,71 | 434 | 11,57 | 842 | 13,43 | 645 | | |
| 7,88 | 24 | 9,74 | 515 | 11,60 | 809 | 13,46 | 638 | | |
| 7,92 | 30 | 9,77 | 642 | 11,63 | 783 | 13,49 | 636 | | |
| 7,95 | 28 | 9,81 | 773 | 11,66 | 804 | 13,52 | 625 | | |
| 7,98 | 31 | 9,84 | 853 | 11,70 | 835 | 13,55 | 611 | | |

Figura B.22: N15, distanza sorgente rivelatore = 200 cm.

(segue) N15, distanza sorgente rivelatore = 200 cm

| E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi |
|---------|----------|---------|----------|---------|----------|---------|----------|---------|----------|
| 8,01 | 33 | 9,87 | 849 | 11,73 | 856 | 13,59 | 608 | | |
| 8,04 | 37 | 9,90 | 738 | 11,76 | 846 | 13,62 | 585 | | |
| 8,07 | 29 | 9,93 | 595 | 11,79 | 819 | 13,65 | 583 | | |
| 8,10 | 32 | 9,96 | 474 | 11,82 | 815 | 13,68 | 560 | | |
| 8,13 | 42 | 9,99 | 424 | 11,85 | 844 | 13,71 | 559 | | |
| 8,16 | 58 | 10,02 | 406 | 11,88 | 874 | 13,74 | 518 | | |
| 8,19 | 87 | 10,05 | 417 | 11,91 | 895 | 13,77 | 510 | | |
| 8,22 | 151 | 10,08 | 415 | 11,94 | 903 | 13,80 | 503 | | |
| 8,26 | 219 | 10,12 | 404 | 11,97 | 910 | 13,83 | 478 | | |
| 8,29 | 263 | 10,15 | 393 | 12,01 | 905 | 13,86 | 451 | | |
| 8,32 | 256 | 10,18 | 407 | 12,04 | 870 | 13,89 | 453 | | |
| 8,35 | 218 | 10,21 | 418 | 12,07 | 871 | 13,93 | 449 | | |
| 8,38 | 154 | 10,24 | 412 | 12,10 | 881 | 13,96 | 419 | | |
| 8,41 | 102 | 10,27 | 417 | 12,13 | 899 | 13,99 | 376 | | |
| 8,44 | 66 | 10,30 | 414 | 12,16 | 890 | 14,02 | 351 | | |
| 8,47 | 55 | 10,33 | 442 | 12,19 | 910 | 14,05 | 327 | | |
| 8,50 | 60 | 10,36 | 469 | 12,22 | 938 | 14,08 | 330 | | |
| 8,53 | 66 | 10,39 | 478 | 12,25 | 954 | 14,11 | 304 | | |
| 8,57 | 70 | 10,42 | 471 | 12,28 | 945 | 14,14 | 267 | | |
| 8,60 | 68 | 10,46 | 488 | 12,31 | 938 | 14,17 | 226 | | |
| 8,63 | 74 | 10,49 | 509 | 12,35 | 952 | 14,20 | 211 | | |
| 8,66 | 82 | 10,52 | 534 | 12,38 | 952 | 14,24 | 192 | | |
| 8,69 | 78 | 10,55 | 546 | 12,41 | 943 | 14,27 | 166 | | |
| 8,72 | 74 | 10,58 | 544 | 12,44 | 960 | 14,30 | 149 | | |
| 8,75 | 84 | 10,61 | 558 | 12,47 | 984 | 14,33 | 132 | | |
| 8,78 | 104 | 10,64 | 574 | 12,50 | 1010 | 14,36 | 116 | | |
| 8,81 | 113 | 10,67 | 585 | 12,53 | 989 | 14,39 | 89 | | |
| 8,84 | 113 | 10,70 | 576 | 12,56 | 1000 | 14,42 | 72 | | |

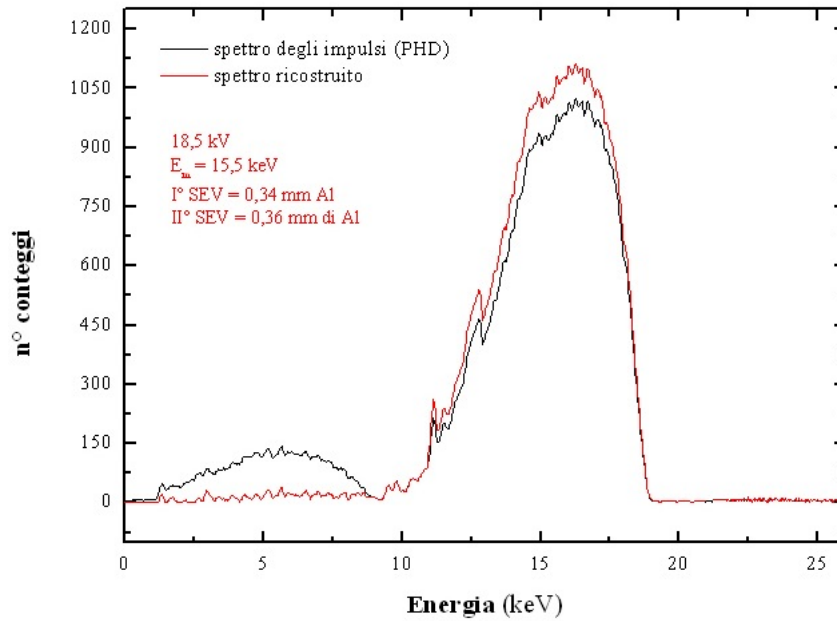
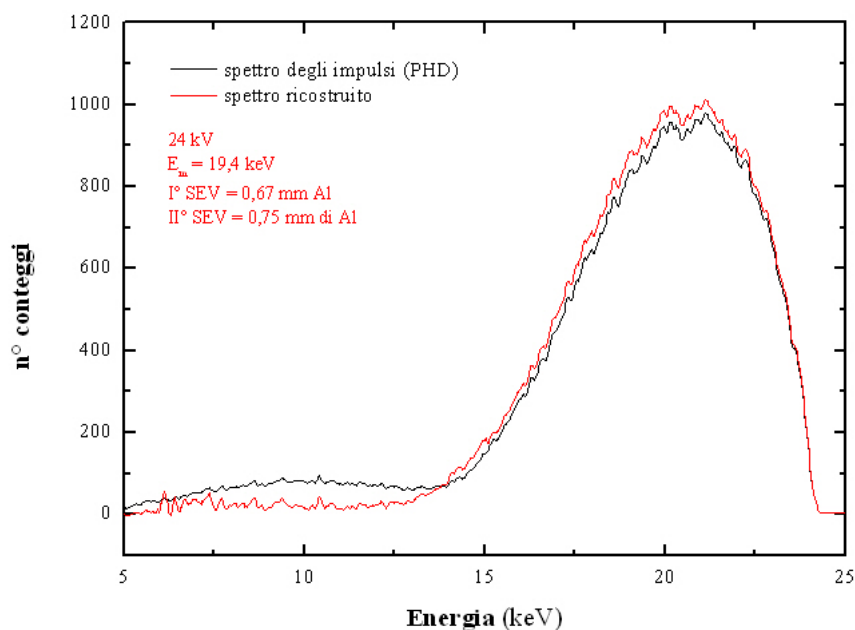


Figura B.23: N20, distanza sorgente rivelatore = 200 cm.

| E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi |
|---------|----------|---------|----------|---------|----------|---------|----------|
| 8,01 | 0 | 11,11 | 91 | 14,20 | 637 | 17,30 | 855 |
| 8,04 | 1 | 11,14 | 94 | 14,24 | 646 | 17,33 | 845 |
| 8,07 | 1 | 11,17 | 99 | 14,27 | 650 | 17,36 | 839 |
| 8,10 | 2 | 11,20 | 101 | 14,30 | 656 | 17,40 | 833 |
| 8,13 | 1 | 11,23 | 101 | 14,33 | 663 | 17,43 | 826 |
| 8,16 | 3 | 11,26 | 102 | 14,36 | 669 | 17,46 | 825 |
| 8,19 | 3 | 11,29 | 100 | 14,39 | 674 | 17,49 | 819 |
| 8,22 | 4 | 11,32 | 100 | 14,42 | 682 | 17,52 | 809 |
| 8,26 | 5 | 11,35 | 103 | 14,45 | 683 | 17,55 | 797 |
| 8,29 | 7 | 11,39 | 104 | 14,48 | 690 | 17,58 | 787 |
| 8,32 | 8 | 11,42 | 105 | 14,51 | 695 | 17,61 | 774 |
| 8,35 | 9 | 11,45 | 107 | 14,55 | 701 | 17,64 | 764 |
| 8,38 | 10 | 11,48 | 110 | 14,58 | 708 | 17,67 | 752 |
| 8,41 | 13 | 11,51 | 111 | 14,61 | 716 | 17,71 | 738 |
| 8,44 | 14 | 11,54 | 115 | 14,64 | 723 | 17,74 | 726 |
| 8,47 | 17 | 11,57 | 118 | 14,67 | 730 | 17,77 | 709 |
| 8,50 | 16 | 11,60 | 118 | 14,70 | 743 | 17,80 | 693 |
| 8,53 | 18 | 11,63 | 119 | 14,73 | 757 | 17,83 | 676 |
| 8,57 | 19 | 11,66 | 121 | 14,76 | 766 | 17,86 | 658 |
| 8,60 | 19 | 11,70 | 121 | 14,79 | 777 | 17,89 | 644 |
| 8,63 | 18 | 11,73 | 124 | 14,82 | 786 | 17,92 | 626 |
| 8,66 | 18 | 11,76 | 125 | 14,86 | 792 | 17,95 | 615 |
| 8,69 | 18 | 11,79 | 131 | 14,89 | 798 | 17,98 | 600 |
| 8,72 | 17 | 11,82 | 135 | 14,92 | 803 | 18,01 | 585 |
| 8,75 | 15 | 11,85 | 139 | 14,95 | 807 | 18,05 | 573 |
| 8,78 | 13 | 11,88 | 141 | 14,98 | 817 | 18,08 | 552 |
| 8,81 | 11 | 11,91 | 144 | 15,01 | 826 | 18,11 | 537 |
| 8,84 | 9 | 11,94 | 146 | 15,04 | 825 | 18,14 | 519 |
| 8,88 | 8 | 11,97 | 149 | 15,07 | 831 | 18,17 | 498 |
| 8,91 | 7 | 12,01 | 152 | 15,10 | 839 | 18,20 | 479 |
| 8,94 | 7 | 12,04 | 155 | 15,13 | 842 | 18,23 | 456 |
| 8,97 | 6 | 12,07 | 158 | 15,17 | 845 | 18,26 | 437 |
| 9,00 | 5 | 12,10 | 166 | 15,20 | 854 | 18,29 | 410 |
| 9,03 | 5 | 12,13 | 169 | 15,23 | 863 | 18,32 | 385 |
| 9,06 | 4 | 12,16 | 171 | 15,26 | 871 | 18,36 | 357 |
| 9,09 | 4 | 12,19 | 177 | 15,29 | 880 | 18,39 | 325 |
| 9,12 | 3 | 12,22 | 182 | 15,32 | 883 | 18,42 | 297 |
| 9,15 | 4 | 12,25 | 188 | 15,35 | 882 | 18,45 | 264 |
| 9,19 | 4 | 12,28 | 192 | 15,38 | 891 | 18,48 | 234 |
| 9,22 | 5 | 12,31 | 196 | 15,41 | 890 | 18,51 | 205 |
| 9,25 | 5 | 12,35 | 202 | 15,44 | 895 | 18,54 | 173 |
| 9,28 | 6 | 12,38 | 207 | 15,47 | 902 | 18,57 | 145 |
| 9,31 | 6 | 12,41 | 213 | 15,51 | 906 | 18,60 | 117 |
| 9,34 | 8 | 12,44 | 215 | 15,54 | 908 | 18,63 | 93 |
| 9,37 | 10 | 12,47 | 224 | 15,57 | 914 | 18,67 | 71 |
| 9,40 | 12 | 12,50 | 231 | 15,60 | 918 | 18,70 | 52 |
| 9,43 | 14 | 12,53 | 236 | 15,63 | 916 | 18,73 | 38 |
| 9,46 | 15 | 12,56 | 241 | 15,66 | 917 | 18,76 | 27 |
| 9,50 | 16 | 12,59 | 243 | 15,69 | 927 | 18,79 | 18 |
| 9,53 | 17 | 12,62 | 251 | 15,72 | 934 | 18,82 | 12 |
| 9,56 | 18 | 12,66 | 261 | 15,75 | 936 | 18,85 | 7 |
| 9,59 | 20 | 12,69 | 270 | 15,78 | 936 | 18,88 | 6 |
| 9,62 | 21 | 12,72 | 275 | 15,82 | 939 | 18,91 | 4 |
| 9,65 | 23 | 12,75 | 280 | 15,85 | 942 | 18,94 | 3 |
| 9,68 | 23 | 12,78 | 286 | 15,88 | 946 | 18,97 | 2 |
| 9,71 | 23 | 12,81 | 288 | 15,91 | 945 | 19,01 | 2 |
| 9,74 | 23 | 12,84 | 294 | 15,94 | 946 | 19,04 | 2 |

(segue) N20, distanza sorgente rivelatore = 200 cm

| E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi |
|---------|----------|---------|----------|---------|----------|---------|----------|
| 9,77 | 22 | 12,87 | 299 | 15,97 | 950 | 19,07 | 2 |
| 9,81 | 21 | 12,90 | 304 | 16,00 | 957 | 19,10 | 2 |
| 9,84 | 21 | 12,93 | 316 | 16,03 | 954 | 19,13 | 2 |
| 9,87 | 20 | 12,97 | 324 | 16,06 | 944 | 19,16 | 2 |
| 9,90 | 20 | 13,00 | 332 | 16,09 | 946 | 19,19 | 2 |
| 9,93 | 19 | 13,03 | 335 | 16,13 | 948 | 19,22 | 3 |
| 9,96 | 18 | 13,06 | 346 | 16,16 | 946 | 19,25 | 2 |
| 9,99 | 16 | 13,09 | 351 | 16,19 | 946 | 19,28 | 3 |
| 10,02 | 15 | 13,12 | 359 | 16,22 | 946 | 19,32 | 2 |
| 10,05 | 15 | 13,15 | 368 | 16,25 | 947 | 19,35 | 2 |
| 10,08 | 15 | 13,18 | 377 | 16,28 | 946 | 19,38 | 3 |
| 10,12 | 16 | 13,21 | 384 | 16,31 | 946 | 19,41 | 3 |
| 10,15 | 16 | 13,24 | 392 | 16,34 | 946 | 19,44 | 3 |
| 10,18 | 17 | 13,28 | 392 | 16,37 | 951 | 19,47 | 3 |
| 10,21 | 19 | 13,31 | 400 | 16,40 | 957 | 19,50 | 3 |
| 10,24 | 21 | 13,34 | 403 | 16,44 | 958 | 19,53 | 2 |
| 10,27 | 22 | 13,37 | 413 | 16,47 | 961 | 19,56 | 2 |
| 10,30 | 22 | 13,40 | 419 | 16,50 | 962 | 19,59 | 2 |
| 10,33 | 23 | 13,43 | 427 | 16,53 | 968 | 19,63 | 2 |
| 10,36 | 25 | 13,46 | 432 | 16,56 | 966 | 19,66 | 2 |
| 10,39 | 25 | 13,49 | 439 | 16,59 | 964 | 19,69 | 2 |
| 10,42 | 26 | 13,52 | 449 | 16,62 | 961 | 19,72 | 2 |
| 10,46 | 27 | 13,55 | 460 | 16,65 | 961 | 19,75 | 2 |
| 10,49 | 29 | 13,59 | 474 | 16,68 | 952 | 19,78 | 2 |
| 10,52 | 31 | 13,62 | 485 | 16,71 | 943 | 19,81 | 2 |
| 10,55 | 31 | 13,65 | 493 | 16,74 | 939 | 19,84 | 2 |
| 10,58 | 32 | 13,68 | 500 | 16,78 | 933 | 19,87 | 3 |
| 10,61 | 33 | 13,71 | 504 | 16,81 | 924 | 19,90 | 3 |
| 10,64 | 36 | 13,74 | 511 | 16,84 | 919 | 19,94 | 2 |
| 10,67 | 39 | 13,77 | 521 | 16,87 | 914 | 19,97 | 3 |
| 10,70 | 41 | 13,80 | 535 | 16,90 | 906 | 20,00 | 3 |
| 10,73 | 44 | 13,83 | 541 | 16,93 | 904 | | |
| 10,77 | 48 | 13,86 | 547 | 16,96 | 906 | | |
| 10,80 | 49 | 13,89 | 551 | 16,99 | 903 | | |
| 10,83 | 49 | 13,93 | 558 | 17,02 | 901 | | |
| 10,86 | 50 | 13,96 | 569 | 17,05 | 900 | | |
| 10,89 | 56 | 13,99 | 574 | 17,09 | 897 | | |
| 10,92 | 63 | 14,02 | 587 | 17,12 | 888 | | |
| 10,95 | 71 | 14,05 | 596 | 17,15 | 886 | | |
| 10,98 | 77 | 14,08 | 602 | 17,18 | 883 | | |
| 11,01 | 81 | 14,11 | 614 | 17,21 | 876 | | |
| 11,04 | 86 | 14,14 | 619 | 17,24 | 875 | | |
| 11,08 | 89 | 14,17 | 630 | 17,27 | 865 | | |

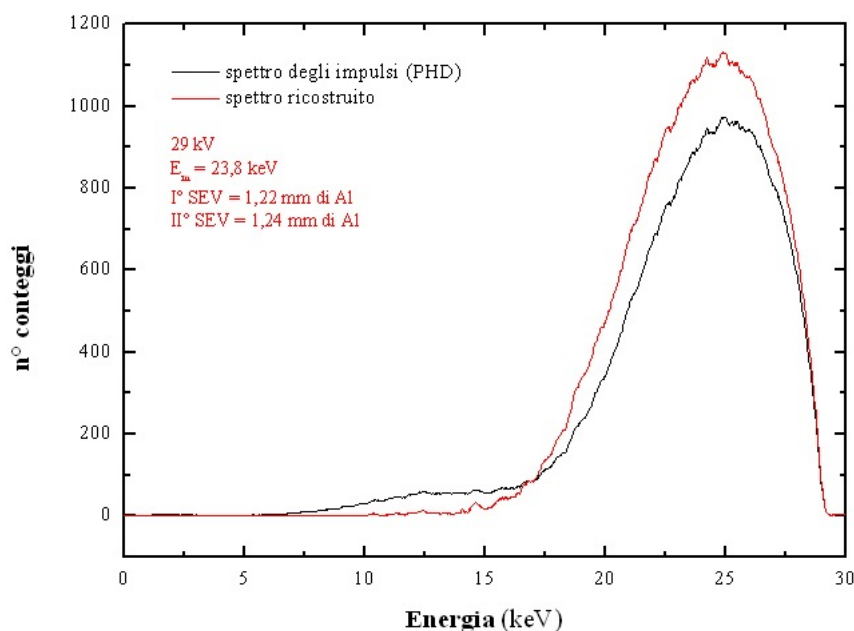


| E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi |
|---------|----------|---------|----------|---------|----------|---------|----------|---------|----------|---------|----------|---------|----------|
| 5,00 | 0 | 8,10 | 10 | 11,20 | 14 | 14,30 | 91 | 17,40 | 522 | 20,49 | 914 | 23,59 | 404 |
| 5,03 | 0 | 8,13 | 9 | 11,23 | 11 | 14,33 | 90 | 17,43 | 532 | 20,52 | 916 | 23,62 | 396 |
| 5,06 | 0 | 8,16 | 7 | 11,26 | 10 | 14,36 | 87 | 17,46 | 541 | 20,55 | 928 | 23,65 | 386 |
| 5,09 | 0 | 8,19 | 8 | 11,29 | 11 | 14,39 | 86 | 17,49 | 553 | 20,59 | 939 | 23,68 | 375 |
| 5,13 | 0 | 8,22 | 9 | 11,32 | 13 | 14,42 | 87 | 17,52 | 565 | 20,62 | 941 | 23,71 | 358 |
| 5,16 | 0 | 8,26 | 11 | 11,35 | 13 | 14,45 | 89 | 17,55 | 570 | 20,65 | 937 | 23,74 | 342 |
| 5,19 | 1 | 8,29 | 11 | 11,39 | 12 | 14,48 | 95 | 17,58 | 569 | 20,68 | 933 | 23,78 | 322 |
| 5,22 | 1 | 8,32 | 11 | 11,42 | 10 | 14,51 | 101 | 17,61 | 573 | 20,71 | 932 | 23,81 | 296 |
| 5,25 | 3 | 8,35 | 7 | 11,45 | 10 | 14,55 | 105 | 17,64 | 580 | 20,74 | 938 | 23,84 | 270 |
| 5,28 | 3 | 8,38 | 8 | 11,48 | 15 | 14,58 | 107 | 17,67 | 590 | 20,77 | 947 | 23,87 | 249 |
| 5,31 | 5 | 8,41 | 8 | 11,51 | 19 | 14,61 | 109 | 17,71 | 607 | 20,80 | 958 | 23,90 | 222 |
| 5,34 | 5 | 8,44 | 10 | 11,54 | 19 | 14,64 | 110 | 17,74 | 623 | 20,83 | 963 | 23,93 | 198 |
| 5,37 | 4 | 8,47 | 11 | 11,57 | 17 | 14,67 | 110 | 17,77 | 627 | 20,86 | 962 | 23,96 | 175 |
| 5,40 | 2 | 8,50 | 12 | 11,60 | 17 | 14,70 | 114 | 17,80 | 624 | 20,90 | 962 | 23,99 | 146 |
| 5,44 | 2 | 8,53 | 13 | 11,63 | 17 | 14,73 | 118 | 17,83 | 622 | 20,93 | 962 | 24,02 | 117 |
| 5,47 | 1 | 8,57 | 16 | 11,66 | 16 | 14,76 | 120 | 17,86 | 626 | 20,96 | 955 | 24,05 | 93 |
| 5,50 | 3 | 8,60 | 18 | 11,70 | 16 | 14,79 | 123 | 17,89 | 638 | 20,99 | 955 | 24,08 | 71 |
| 5,53 | 5 | 8,63 | 17 | 11,73 | 13 | 14,82 | 127 | 17,92 | 641 | 21,02 | 956 | 24,12 | 53 |
| 5,56 | 7 | 8,66 | 14 | 11,76 | 12 | 14,86 | 132 | 17,95 | 648 | 21,05 | 962 | 24,15 | 40 |
| 5,59 | 9 | 8,69 | 9 | 11,79 | 13 | 14,89 | 136 | 17,98 | 648 | 21,08 | 973 | 24,18 | 30 |
| 5,62 | 9 | 8,72 | 8 | 11,82 | 15 | 14,92 | 141 | 18,01 | 637 | 21,11 | 978 | 24,21 | 21 |
| 5,65 | 9 | 8,75 | 8 | 11,85 | 14 | 14,95 | 146 | 18,05 | 637 | 21,14 | 976 | 24,24 | 13 |
| 5,68 | 7 | 8,78 | 10 | 11,88 | 16 | 14,98 | 146 | 18,08 | 651 | 21,17 | 976 | 24,27 | 8 |
| 5,71 | 6 | 8,81 | 10 | 11,91 | 14 | 15,01 | 146 | 18,11 | 658 | 21,20 | 968 | 24,30 | 5 |
| 5,75 | 5 | 8,84 | 8 | 11,94 | 15 | 15,04 | 152 | 18,14 | 670 | 21,24 | 962 | 24,33 | 4 |
| 5,78 | 6 | 8,88 | 5 | 11,97 | 16 | 15,07 | 155 | 18,17 | 680 | 21,27 | 960 | 24,36 | 3 |
| 5,81 | 6 | 8,91 | 4 | 12,01 | 17 | 15,10 | 156 | 18,20 | 686 | 21,30 | 956 | 24,39 | 3 |
| 5,84 | 5 | 8,94 | 5 | 12,04 | 16 | 15,13 | 164 | 18,23 | 685 | 21,33 | 948 | 24,43 | 4 |
| 5,87 | 3 | 8,97 | 7 | 12,07 | 19 | 15,17 | 170 | 18,26 | 686 | 21,36 | 951 | 24,46 | 4 |
| 5,90 | 3 | 9,00 | 8 | 12,10 | 20 | 15,20 | 174 | 18,29 | 694 | 21,39 | 944 | 24,49 | 5 |
| 5,93 | 2 | 9,03 | 8 | 12,13 | 23 | 15,23 | 182 | 18,32 | 702 | 21,42 | 937 | 24,52 | 4 |
| 5,96 | 0 | 9,06 | 8 | 12,16 | 22 | 15,26 | 182 | 18,36 | 712 | 21,45 | 930 | 24,55 | 4 |
| 5,99 | 2 | 9,09 | 8 | 12,19 | 20 | 15,29 | 181 | 18,39 | 727 | 21,48 | 927 | 24,58 | 3 |
| 6,02 | 4 | 9,12 | 10 | 12,22 | 14 | 15,32 | 181 | 18,42 | 736 | 21,51 | 925 | 24,61 | 3 |
| 6,06 | 4 | 9,15 | 13 | 12,25 | 11 | 15,35 | 183 | 18,45 | 735 | 21,55 | 933 | 24,64 | 3 |
| 6,09 | 7 | 9,19 | 14 | 12,28 | 10 | 15,38 | 184 | 18,48 | 739 | 21,58 | 931 | 24,67 | 3 |
| 6,12 | 10 | 9,22 | 15 | 12,31 | 15 | 15,41 | 191 | 18,51 | 751 | 21,61 | 927 | 24,70 | 3 |
| 6,15 | 8 | 9,25 | 15 | 12,35 | 18 | 15,44 | 196 | 18,54 | 764 | 21,64 | 913 | 24,73 | 3 |
| 6,18 | 6 | 9,28 | 16 | 12,38 | 21 | 15,47 | 204 | 18,57 | 774 | 21,67 | 909 | 24,77 | 3 |
| 6,21 | 4 | 9,31 | 16 | 12,41 | 22 | 15,51 | 211 | 18,60 | 773 | 21,70 | 904 | 24,80 | 3 |
| 6,24 | 1 | 9,34 | 18 | 12,44 | 21 | 15,54 | 217 | 18,63 | 764 | 21,73 | 907 | 24,83 | 3 |
| 6,27 | 0 | 9,37 | 20 | 12,47 | 20 | 15,57 | 219 | 18,67 | 755 | 21,76 | 903 | 24,86 | 3 |
| 6,30 | 0 | 9,40 | 22 | 12,50 | 21 | 15,60 | 219 | 18,70 | 751 | 21,79 | 896 | 24,89 | 3 |
| 6,33 | 3 | 9,43 | 19 | 12,53 | 22 | 15,63 | 227 | 18,73 | 759 | 21,82 | 888 | 24,92 | 3 |
| 6,37 | 7 | 9,46 | 18 | 12,56 | 22 | 15,66 | 230 | 18,76 | 771 | 21,86 | 888 | 24,95 | 3 |
| 6,40 | 9 | 9,50 | 16 | 12,59 | 21 | 15,69 | 231 | 18,79 | 780 | 21,89 | 897 | 24,98 | 3 |
| 6,43 | 7 | 9,53 | 13 | 12,62 | 20 | 15,72 | 236 | 18,82 | 790 | 21,92 | 899 | 25,01 | 3 |
| 6,46 | 7 | 9,56 | 12 | 12,66 | 19 | 15,75 | 243 | 18,85 | 797 | 21,95 | 893 | 25,04 | 4 |
| 6,49 | 3 | 9,59 | 12 | 12,69 | 20 | 15,78 | 248 | 18,88 | 801 | 21,98 | 879 | 25,08 | 4 |
| 6,52 | 1 | 9,62 | 10 | 12,72 | 19 | 15,82 | 254 | 18,91 | 810 | 22,01 | 866 | 25,11 | 4 |
| 6,55 | 2 | 9,65 | 10 | 12,75 | 18 | 15,85 | 262 | 18,94 | 816 | 22,04 | 853 | 25,14 | 4 |
| 6,58 | 4 | 9,68 | 11 | 12,78 | 19 | 15,88 | 267 | 18,97 | 826 | 22,07 | 848 | 25,17 | 3 |
| 6,61 | 4 | 9,71 | 13 | 12,81 | 21 | 15,91 | 272 | 19,01 | 840 | 22,10 | 846 | 25,20 | 3 |
| 6,64 | 7 | 9,74 | 15 | 12,84 | 24 | 15,94 | 273 | 19,04 | 840 | 22,13 | 850 | 25,23 | 4 |
| 6,68 | 9 | 9,77 | 14 | 12,87 | 25 | 15,97 | 280 | 19,07 | 844 | 22,16 | 855 | 25,26 | 4 |
| 6,71 | 9 | 9,81 | 13 | 12,90 | 25 | 16,00 | 283 | 19,10 | 839 | 22,20 | 863 | 25,29 | 5 |

Figura B.24: *N25*, distanza sorgente rivelatore = 200 cm.

(segue) N25, distanza sorgente rivelatore = 200 cm

| E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi |
|------------|----------|------------|----------|------------|----------|------------|----------|------------|----------|------------|----------|------------|----------|
| 6,74 | 7 | 9,84 | 13 | 12,93 | 23 | 16,03 | 289 | 19,13 | 833 | 22,23 | 866 | 25,32 | 5 |
| 6,77 | 7 | 9,87 | 12 | 12,97 | 22 | 16,06 | 295 | 19,16 | 833 | 22,26 | 863 | 25,35 | 4 |
| 6,80 | 6 | 9,90 | 13 | 13,00 | 23 | 16,09 | 293 | 19,19 | 837 | 22,29 | 853 | 25,39 | 3 |
| 6,83 | 7 | 9,93 | 13 | 13,03 | 24 | 16,13 | 289 | 19,22 | 835 | 22,32 | 844 | 25,42 | 2 |
| 6,86 | 7 | 9,96 | 11 | 13,06 | 27 | 16,16 | 291 | 19,25 | 843 | 22,35 | 822 | 25,45 | 2 |
| 6,89 | 10 | 9,99 | 10 | 13,09 | 29 | 16,19 | 299 | 19,28 | 853 | 22,38 | 806 | 25,48 | 2 |
| 6,92 | 10 | 10,02 | 10 | 13,12 | 31 | 16,22 | 315 | 19,32 | 859 | 22,41 | 790 | 25,51 | 4 |
| 6,95 | 10 | 10,05 | 9 | 13,15 | 33 | 16,25 | 326 | 19,35 | 876 | 22,44 | 784 | 25,54 | 5 |
| 6,99 | 10 | 10,08 | 8 | 13,18 | 35 | 16,28 | 332 | 19,38 | 875 | 22,47 | 779 | 25,57 | 5 |
| 7,02 | 9 | 10,12 | 8 | 13,21 | 36 | 16,31 | 334 | 19,41 | 871 | 22,51 | 779 | 25,60 | 5 |
| 7,05 | 9 | 10,15 | 10 | 13,24 | 38 | 16,34 | 332 | 19,44 | 863 | 22,54 | 776 | 25,63 | 4 |
| 7,08 | 9 | 10,18 | 12 | 13,28 | 38 | 16,37 | 328 | 19,47 | 859 | 22,57 | 770 | 25,66 | 3 |
| 7,11 | 7 | 10,21 | 15 | 13,31 | 37 | 16,40 | 332 | 19,50 | 854 | 22,60 | 764 | 25,69 | 2 |
| 7,14 | 7 | 10,24 | 14 | 13,34 | 36 | 16,44 | 339 | 19,53 | 860 | 22,63 | 751 | 25,73 | 2 |
| 7,17 | 10 | 10,27 | 11 | 13,37 | 36 | 16,47 | 348 | 19,56 | 866 | 22,66 | 738 | 25,76 | 2 |
| 7,20 | 9 | 10,30 | 9 | 13,40 | 37 | 16,50 | 360 | 19,59 | 878 | 22,69 | 723 | 25,79 | 3 |
| 7,23 | 11 | 10,33 | 13 | 13,43 | 37 | 16,53 | 369 | 19,63 | 888 | 22,72 | 721 | 25,82 | 3 |
| 7,26 | 12 | 10,36 | 19 | 13,46 | 38 | 16,56 | 375 | 19,66 | 897 | 22,75 | 719 | 25,85 | 3 |
| 7,30 | 14 | 10,39 | 26 | 13,49 | 40 | 16,59 | 378 | 19,69 | 898 | 22,78 | 723 | 25,88 | 3 |
| 7,33 | 15 | 10,42 | 29 | 13,52 | 41 | 16,62 | 380 | 19,72 | 894 | 22,82 | 722 | 25,91 | 3 |
| 7,36 | 17 | 10,46 | 25 | 13,55 | 42 | 16,65 | 378 | 19,75 | 895 | 22,85 | 712 | 25,94 | 3 |
| 7,39 | 15 | 10,49 | 19 | 13,59 | 45 | 16,68 | 375 | 19,78 | 904 | 22,88 | 693 | 25,97 | 4 |
| 7,42 | 12 | 10,52 | 15 | 13,62 | 47 | 16,71 | 377 | 19,81 | 911 | 22,91 | 683 | 26,00 | 5 |
| 7,45 | 9 | 10,55 | 10 | 13,65 | 48 | 16,74 | 388 | 19,84 | 923 | 22,94 | 671 | 26,04 | 4 |
| 7,48 | 6 | 10,58 | 11 | 13,68 | 48 | 16,78 | 401 | 19,87 | 935 | 22,97 | 658 | 26,07 | 4 |
| 7,51 | 4 | 10,61 | 13 | 13,71 | 49 | 16,81 | 420 | 19,90 | 940 | 23,00 | 648 | 26,10 | 3 |
| 7,54 | 3 | 10,64 | 13 | 13,74 | 50 | 16,84 | 430 | 19,94 | 943 | 23,03 | 637 | 26,13 | 2 |
| 7,57 | 4 | 10,67 | 14 | 13,77 | 52 | 16,87 | 436 | 19,97 | 946 | 23,06 | 618 | 26,16 | 2 |
| 7,61 | 6 | 10,70 | 17 | 13,80 | 55 | 16,90 | 441 | 20,00 | 940 | 23,09 | 600 | 26,19 | 2 |
| 7,64 | 10 | 10,73 | 17 | 13,83 | 56 | 16,93 | 444 | 20,03 | 929 | 23,12 | 590 | 26,22 | 3 |
| 7,67 | 12 | 10,77 | 19 | 13,86 | 55 | 16,96 | 446 | 20,06 | 934 | 23,16 | 579 | 26,25 | 4 |
| 7,70 | 14 | 10,80 | 17 | 13,89 | 56 | 16,99 | 451 | 20,09 | 940 | 23,19 | 566 | 26,28 | 4 |
| 7,73 | 13 | 10,83 | 15 | 13,93 | 56 | 17,02 | 454 | 20,12 | 956 | 23,22 | 558 | 26,31 | 4 |
| 7,76 | 10 | 10,86 | 13 | 13,96 | 60 | 17,05 | 458 | 20,15 | 956 | 23,25 | 549 | 26,35 | 4 |
| 7,79 | 6 | 10,89 | 10 | 13,99 | 63 | 17,09 | 468 | 20,18 | 956 | 23,28 | 542 | 26,38 | 3 |
| 7,82 | 5 | 10,92 | 10 | 14,02 | 70 | 17,12 | 472 | 20,21 | 943 | 23,31 | 537 | 26,41 | 3 |
| 7,85 | 5 | 10,95 | 9 | 14,05 | 75 | 17,15 | 480 | 20,24 | 942 | 23,34 | 526 | 26,44 | 3 |
| 7,88 | 7 | 10,98 | 10 | 14,08 | 79 | 17,18 | 486 | 20,28 | 941 | 23,37 | 511 | 26,47 | 3 |
| 7,92 | 9 | 11,01 | 10 | 14,11 | 79 | 17,21 | 498 | 20,31 | 949 | 23,40 | 489 | 26,50 | 3 |
| 7,95 | 9 | 11,04 | 9 | 14,14 | 78 | 17,24 | 509 | 20,34 | 943 | 23,43 | 462 | | |
| 7,98 | 7 | 11,08 | 8 | 14,17 | 77 | 17,27 | 523 | 20,37 | 939 | 23,47 | 442 | | |
| 8,01 | 9 | 11,11 | 10 | 14,20 | 82 | 17,30 | 530 | 20,40 | 926 | 23,50 | 425 | | |
| 8,04 | 10 | 11,14 | 11 | 14,24 | 87 | 17,33 | 531 | 20,43 | 919 | 23,53 | 411 | | |
| 8,07 | 10 | 11,17 | 14 | 14,27 | 89 | 17,36 | 524 | 20,46 | 914 | 23,56 | 406 | | |

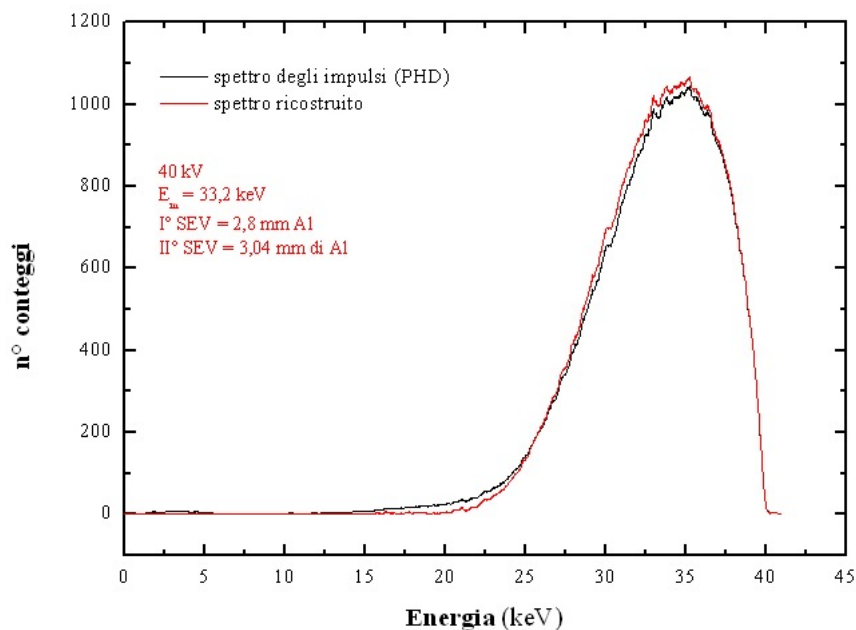


| E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi |
|---------|----------|---------|----------|---------|----------|---------|----------|---------|----------|---------|----------|---------|----------|
| 10,02 | 2 | 13,12 | 6 | 16,22 | 45 | 19,32 | 369 | 22,41 | 920 | 25,51 | 1105 | 28,61 | 345 |
| 10,05 | 2 | 13,15 | 5 | 16,25 | 46 | 19,35 | 372 | 22,44 | 927 | 25,54 | 1093 | 28,64 | 327 |
| 10,08 | 2 | 13,18 | 5 | 16,28 | 48 | 19,38 | 378 | 22,47 | 930 | 25,57 | 1087 | 28,67 | 312 |
| 10,12 | 1 | 13,21 | 6 | 16,31 | 52 | 19,41 | 380 | 22,51 | 936 | 25,60 | 1086 | 28,70 | 293 |
| 10,15 | 1 | 13,24 | 7 | 16,34 | 54 | 19,44 | 384 | 22,54 | 944 | 25,63 | 1081 | 28,73 | 271 |
| 10,18 | 3 | 13,28 | 8 | 16,37 | 58 | 19,47 | 389 | 22,57 | 947 | 25,66 | 1085 | 28,76 | 247 |
| 10,21 | 3 | 13,31 | 7 | 16,40 | 56 | 19,50 | 398 | 22,60 | 945 | 25,69 | 1086 | 28,79 | 227 |
| 10,24 | 3 | 13,34 | 7 | 16,44 | 56 | 19,53 | 407 | 22,63 | 950 | 25,73 | 1084 | 28,82 | 204 |
| 10,27 | 5 | 13,37 | 6 | 16,47 | 55 | 19,56 | 414 | 22,66 | 950 | 25,76 | 1076 | 28,85 | 181 |
| 10,30 | 6 | 13,40 | 6 | 16,50 | 60 | 19,59 | 423 | 22,69 | 943 | 25,79 | 1078 | 28,88 | 159 |
| 10,33 | 6 | 13,43 | 5 | 16,53 | 63 | 19,63 | 427 | 22,72 | 938 | 25,82 | 1071 | 28,91 | 136 |
| 10,36 | 5 | 13,46 | 6 | 16,56 | 68 | 19,66 | 429 | 22,75 | 944 | 25,85 | 1070 | 28,95 | 116 |
| 10,39 | 5 | 13,49 | 7 | 16,59 | 69 | 19,69 | 437 | 22,78 | 947 | 25,88 | 1070 | 28,98 | 95 |
| 10,42 | 6 | 13,52 | 6 | 16,62 | 75 | 19,72 | 441 | 22,82 | 955 | 25,91 | 1072 | 29,01 | 76 |
| 10,46 | 5 | 13,55 | 6 | 16,65 | 77 | 19,75 | 442 | 22,85 | 961 | 25,94 | 1071 | 29,04 | 60 |
| 10,49 | 5 | 13,59 | 6 | 16,68 | 78 | 19,78 | 449 | 22,88 | 958 | 25,97 | 1072 | 29,07 | 46 |
| 10,52 | 4 | 13,62 | 4 | 16,71 | 77 | 19,81 | 456 | 22,91 | 962 | 26,00 | 1072 | 29,10 | 35 |
| 10,55 | 5 | 13,65 | 4 | 16,74 | 82 | 19,84 | 460 | 22,94 | 965 | 26,04 | 1066 | 29,13 | 24 |
| 10,58 | 4 | 13,68 | 5 | 16,78 | 82 | 19,87 | 460 | 22,97 | 974 | 26,07 | 1064 | 29,16 | 18 |
| 10,61 | 2 | 13,71 | 5 | 16,81 | 85 | 19,90 | 462 | 23,00 | 983 | 26,10 | 1062 | 29,19 | 12 |
| 10,64 | 2 | 13,74 | 5 | 16,84 | 85 | 19,94 | 462 | 23,03 | 995 | 26,13 | 1062 | 29,22 | 9 |
| 10,67 | 2 | 13,77 | 6 | 16,87 | 85 | 19,97 | 469 | 23,06 | 1000 | 26,16 | 1057 | 29,26 | 5 |
| 10,70 | 2 | 13,80 | 6 | 16,90 | 83 | 20,00 | 472 | 23,09 | 997 | 26,19 | 1052 | 29,29 | 4 |
| 10,73 | 1 | 13,83 | 6 | 16,93 | 85 | 20,03 | 474 | 23,12 | 1004 | 26,22 | 1048 | 29,32 | 4 |
| 10,77 | 1 | 13,86 | 6 | 16,96 | 87 | 20,06 | 479 | 23,16 | 1000 | 26,25 | 1044 | 29,35 | 2 |
| 10,80 | 1 | 13,89 | 6 | 16,99 | 87 | 20,09 | 488 | 23,19 | 1006 | 26,28 | 1039 | 29,38 | 2 |
| 10,83 | 2 | 13,93 | 6 | 17,02 | 83 | 20,12 | 491 | 23,22 | 1011 | 26,31 | 1030 | 29,41 | 2 |
| 10,86 | 2 | 13,96 | 7 | 17,05 | 86 | 20,15 | 498 | 23,25 | 1014 | 26,35 | 1020 | 29,44 | 2 |
| 10,89 | 2 | 13,99 | 7 | 17,09 | 87 | 20,18 | 500 | 23,28 | 1021 | 26,38 | 1019 | 29,47 | 3 |
| 10,92 | 3 | 14,02 | 14 | 17,12 | 91 | 20,21 | 510 | 23,31 | 1023 | 26,41 | 1019 | 29,50 | 3 |
| 10,95 | 2 | 14,05 | 17 | 17,15 | 95 | 20,24 | 519 | 23,34 | 1023 | 26,44 | 1020 | 29,53 | 3 |
| 10,98 | 3 | 14,08 | 16 | 17,18 | 98 | 20,28 | 525 | 23,37 | 1028 | 26,47 | 1009 | 29,56 | 3 |
| 11,01 | 4 | 14,11 | 13 | 17,21 | 101 | 20,31 | 526 | 23,40 | 1032 | 26,50 | 1007 | 29,60 | 3 |
| 11,04 | 4 | 14,14 | 11 | 17,24 | 109 | 20,34 | 536 | 23,43 | 1037 | 26,53 | 1003 | 29,63 | 3 |
| 11,08 | 4 | 14,17 | 8 | 17,27 | 110 | 20,37 | 540 | 23,47 | 1036 | 26,56 | 996 | 29,66 | 3 |
| 11,11 | 4 | 14,20 | 11 | 17,30 | 112 | 20,40 | 546 | 23,50 | 1050 | 26,59 | 990 | 29,69 | 3 |
| 11,14 | 4 | 14,24 | 9 | 17,33 | 115 | 20,43 | 551 | 23,53 | 1056 | 26,62 | 981 | 29,72 | 3 |
| 11,17 | 4 | 14,27 | 9 | 17,36 | 124 | 20,46 | 557 | 23,56 | 1056 | 26,65 | 976 | 29,75 | 3 |
| 11,20 | 4 | 14,30 | 9 | 17,40 | 127 | 20,49 | 560 | 23,59 | 1062 | 26,69 | 969 | 29,78 | 3 |
| 11,23 | 5 | 14,33 | 12 | 17,43 | 130 | 20,52 | 566 | 23,62 | 1063 | 26,72 | 964 | 29,81 | 3 |
| 11,26 | 5 | 14,36 | 16 | 17,46 | 134 | 20,55 | 575 | 23,65 | 1065 | 26,75 | 955 | 29,84 | 3 |
| 11,29 | 7 | 14,39 | 15 | 17,49 | 134 | 20,59 | 580 | 23,68 | 1064 | 26,78 | 943 | 29,87 | 3 |
| 11,32 | 7 | 14,42 | 17 | 17,52 | 138 | 20,62 | 590 | 23,71 | 1058 | 26,81 | 934 | 29,91 | 3 |
| 11,35 | 6 | 14,45 | 23 | 17,55 | 137 | 20,65 | 597 | 23,74 | 1060 | 26,84 | 928 | 29,94 | 3 |
| 11,39 | 5 | 14,48 | 24 | 17,58 | 137 | 20,68 | 598 | 23,78 | 1070 | 26,87 | 919 | 29,97 | 3 |
| 11,42 | 6 | 14,51 | 28 | 17,61 | 140 | 20,71 | 604 | 23,81 | 1074 | 26,90 | 915 | 30,00 | 4 |
| 11,45 | 6 | 14,55 | 29 | 17,64 | 143 | 20,74 | 618 | 23,84 | 1066 | 26,93 | 904 | 30,03 | 4 |
| 11,48 | 4 | 14,58 | 32 | 17,67 | 146 | 20,77 | 627 | 23,87 | 1063 | 26,96 | 900 | 30,06 | 4 |
| 11,51 | 4 | 14,61 | 33 | 17,71 | 147 | 20,80 | 632 | 23,90 | 1069 | 27,00 | 898 | 30,09 | 4 |
| 11,54 | 5 | 14,64 | 32 | 17,74 | 150 | 20,83 | 637 | 23,93 | 1073 | 27,03 | 898 | 30,12 | 3 |
| 11,57 | 3 | 14,67 | 32 | 17,77 | 152 | 20,86 | 648 | 23,96 | 1080 | 27,06 | 892 | 30,15 | 3 |
| 11,60 | 3 | 14,70 | 30 | 17,80 | 157 | 20,90 | 653 | 23,99 | 1082 | 27,09 | 887 | 30,18 | 3 |
| 11,63 | 3 | 14,73 | 28 | 17,83 | 162 | 20,93 | 658 | 24,02 | 1094 | 27,12 | 885 | 30,21 | 3 |
| 11,66 | 2 | 14,76 | 26 | 17,86 | 166 | 20,96 | 666 | 24,05 | 1098 | 27,15 | 875 | 30,25 | 3 |
| 11,70 | 3 | 14,79 | 24 | 17,89 | 170 | 20,99 | 675 | 24,08 | 1102 | 27,18 | 863 | 30,28 | 3 |

Figura B.25: $N30$, distanza sorgente rivelatore = 200 cm.

(segue) N30, distanza sorgente rivelatore = 200 cm

| E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi |
|------------|----------|------------|----------|------------|----------|------------|----------|------------|----------|------------|----------|------------|----------|
| 11,73 | 4 | 14,82 | 23 | 17,92 | 174 | 21,02 | 686 | 24,12 | 1101 | 27,21 | 865 | 30,31 | 3 |
| 11,76 | 4 | 14,86 | 21 | 17,95 | 177 | 21,05 | 696 | 24,15 | 1104 | 27,24 | 855 | 30,34 | 4 |
| 11,79 | 5 | 14,89 | 19 | 17,98 | 182 | 21,08 | 697 | 24,18 | 1114 | 27,27 | 851 | 30,37 | 4 |
| 11,82 | 6 | 14,92 | 20 | 18,01 | 188 | 21,11 | 696 | 24,21 | 1116 | 27,30 | 847 | 30,40 | 4 |
| 11,85 | 7 | 14,95 | 18 | 18,05 | 190 | 21,14 | 702 | 24,24 | 1121 | 27,34 | 834 | 30,43 | 4 |
| 11,88 | 6 | 14,98 | 19 | 18,08 | 191 | 21,17 | 708 | 24,27 | 1113 | 27,37 | 823 | 30,46 | 4 |
| 11,91 | 8 | 15,01 | 16 | 18,11 | 196 | 21,20 | 710 | 24,30 | 1103 | 27,40 | 815 | 30,49 | 4 |
| 11,94 | 8 | 15,04 | 17 | 18,14 | 196 | 21,24 | 710 | 24,33 | 1105 | 27,43 | 807 | 30,52 | 4 |
| 11,97 | 7 | 15,07 | 17 | 18,17 | 199 | 21,27 | 716 | 24,36 | 1101 | 27,46 | 794 | 30,56 | 4 |
| 12,01 | 8 | 15,10 | 18 | 18,20 | 199 | 21,30 | 721 | 24,39 | 1104 | 27,49 | 793 | 30,59 | 4 |
| 12,04 | 8 | 15,13 | 21 | 18,23 | 208 | 21,33 | 723 | 24,43 | 1103 | 27,52 | 792 | 30,62 | 4 |
| 12,07 | 7 | 15,17 | 21 | 18,26 | 209 | 21,36 | 728 | 24,46 | 1096 | 27,55 | 777 | 30,65 | 3 |
| 12,10 | 8 | 15,20 | 21 | 18,29 | 211 | 21,39 | 731 | 24,49 | 1102 | 27,58 | 768 | 30,68 | 3 |
| 12,13 | 7 | 15,23 | 21 | 18,32 | 211 | 21,42 | 737 | 24,52 | 1098 | 27,61 | 760 | 30,71 | 3 |
| 12,16 | 8 | 15,26 | 19 | 18,36 | 211 | 21,45 | 744 | 24,55 | 1097 | 27,65 | 745 | 30,74 | 3 |
| 12,19 | 8 | 15,29 | 22 | 18,39 | 216 | 21,48 | 748 | 24,58 | 1099 | 27,68 | 741 | 30,77 | 3 |
| 12,22 | 9 | 15,32 | 23 | 18,42 | 225 | 21,51 | 760 | 24,61 | 1101 | 27,71 | 733 | 30,80 | 3 |
| 12,25 | 9 | 15,35 | 26 | 18,45 | 229 | 21,55 | 766 | 24,64 | 1112 | 27,74 | 720 | 30,83 | 3 |
| 12,28 | 10 | 15,38 | 26 | 18,48 | 237 | 21,58 | 774 | 24,67 | 1109 | 27,77 | 710 | 30,86 | 2 |
| 12,31 | 11 | 15,41 | 30 | 18,51 | 245 | 21,61 | 780 | 24,70 | 1109 | 27,80 | 703 | 30,90 | 3 |
| 12,35 | 10 | 15,44 | 35 | 18,54 | 256 | 21,64 | 782 | 24,73 | 1112 | 27,83 | 693 | 30,93 | 2 |
| 12,38 | 12 | 15,47 | 31 | 18,57 | 256 | 21,67 | 788 | 24,77 | 1123 | 27,86 | 679 | 30,96 | 2 |
| 12,41 | 12 | 15,51 | 35 | 18,60 | 266 | 21,70 | 796 | 24,80 | 1128 | 27,89 | 668 | 30,99 | 2 |
| 12,44 | 13 | 15,54 | 38 | 18,63 | 274 | 21,73 | 799 | 24,83 | 1128 | 27,92 | 663 | 31,02 | 2 |
| 12,47 | 12 | 15,57 | 40 | 18,67 | 281 | 21,76 | 808 | 24,86 | 1131 | 27,95 | 651 | | |
| 12,50 | 12 | 15,60 | 41 | 18,70 | 291 | 21,79 | 823 | 24,89 | 1133 | 27,99 | 639 | | |
| 12,53 | 11 | 15,63 | 43 | 18,73 | 297 | 21,82 | 834 | 24,92 | 1129 | 28,02 | 625 | | |
| 12,56 | 10 | 15,66 | 41 | 18,76 | 303 | 21,86 | 831 | 24,95 | 1130 | 28,05 | 617 | | |
| 12,59 | 9 | 15,69 | 44 | 18,79 | 308 | 21,89 | 835 | 24,98 | 1129 | 28,08 | 609 | | |
| 12,62 | 8 | 15,72 | 47 | 18,82 | 313 | 21,92 | 840 | 25,01 | 1128 | 28,11 | 593 | | |
| 12,66 | 7 | 15,75 | 45 | 18,85 | 314 | 21,95 | 844 | 25,04 | 1125 | 28,14 | 577 | | |
| 12,69 | 8 | 15,78 | 42 | 18,88 | 314 | 21,98 | 845 | 25,08 | 1117 | 28,17 | 562 | | |
| 12,72 | 8 | 15,82 | 47 | 18,91 | 323 | 22,01 | 856 | 25,11 | 1112 | 28,20 | 553 | | |
| 12,75 | 8 | 15,85 | 44 | 18,94 | 326 | 22,04 | 858 | 25,14 | 1108 | 28,23 | 540 | | |
| 12,78 | 6 | 15,88 | 44 | 18,97 | 329 | 22,07 | 871 | 25,17 | 1100 | 28,26 | 522 | | |
| 12,81 | 7 | 15,91 | 45 | 19,01 | 334 | 22,10 | 872 | 25,20 | 1105 | 28,30 | 509 | | |
| 12,84 | 7 | 15,94 | 44 | 19,04 | 334 | 22,13 | 869 | 25,23 | 1108 | 28,33 | 495 | | |
| 12,87 | 7 | 15,97 | 41 | 19,07 | 340 | 22,16 | 865 | 25,26 | 1107 | 28,36 | 480 | | |
| 12,90 | 6 | 16,00 | 44 | 19,10 | 343 | 22,20 | 871 | 25,29 | 1109 | 28,39 | 461 | | |
| 12,93 | 7 | 16,03 | 42 | 19,13 | 347 | 22,23 | 882 | 25,32 | 1102 | 28,42 | 444 | | |
| 12,97 | 7 | 16,06 | 43 | 19,16 | 347 | 22,26 | 891 | 25,35 | 1099 | 28,45 | 430 | | |
| 13,00 | 6 | 16,09 | 46 | 19,19 | 349 | 22,29 | 894 | 25,39 | 1101 | 28,48 | 416 | | |
| 13,03 | 6 | 16,13 | 48 | 19,22 | 353 | 22,32 | 903 | 25,42 | 1106 | 28,51 | 400 | | |
| 13,06 | 6 | 16,16 | 45 | 19,25 | 354 | 22,35 | 911 | 25,45 | 1100 | 28,54 | 381 | | |
| 13,09 | 6 | 16,19 | 46 | 19,28 | 360 | 22,38 | 919 | 25,48 | 1106 | 28,57 | 364 | | |



| E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi |
|---------|----------|---------|----------|---------|----------|---------|----------|---------|----------|---------|----------|
| 19.01 | 0 | 22.10 | 21 | 25.20 | 144 | 28.30 | 443 | 31.39 | 843 | 34.49 | 1043 |
| 19.04 | 2 | 22.13 | 22 | 25.23 | 146 | 28.33 | 451 | 31.42 | 844 | 34.52 | 1044 |
| 19.07 | 2 | 22.16 | 25 | 25.26 | 149 | 28.36 | 456 | 31.45 | 845 | 34.55 | 1040 |
| 19.10 | 2 | 22.20 | 27 | 25.29 | 154 | 28.39 | 457 | 31.48 | 845 | 34.58 | 1040 |
| 19.13 | 2 | 22.23 | 28 | 25.32 | 160 | 28.42 | 463 | 31.51 | 855 | 34.61 | 1047 |
| 19.16 | 1 | 22.26 | 28 | 25.35 | 161 | 28.45 | 470 | 31.55 | 857 | 34.64 | 1044 |
| 19.19 | 1 | 22.29 | 30 | 25.39 | 162 | 28.48 | 477 | 31.58 | 854 | 34.67 | 1054 |
| 19.22 | 2 | 22.32 | 31 | 25.42 | 166 | 28.51 | 485 | 31.61 | 861 | 34.70 | 1052 |
| 19.25 | 4 | 22.35 | 34 | 25.45 | 170 | 28.54 | 489 | 31.64 | 859 | 34.73 | 1054 |
| 19.28 | 5 | 22.38 | 33 | 25.48 | 173 | 28.57 | 493 | 31.67 | 863 | 34.76 | 1053 |
| 19.32 | 5 | 22.41 | 34 | 25.51 | 175 | 28.61 | 497 | 31.70 | 865 | 34.80 | 1050 |
| 19.35 | 3 | 22.44 | 35 | 25.54 | 179 | 28.64 | 502 | 31.73 | 873 | 34.83 | 1050 |
| 19.38 | 2 | 22.47 | 37 | 25.57 | 179 | 28.67 | 501 | 31.76 | 881 | 34.86 | 1047 |
| 19.41 | 1 | 22.51 | 36 | 25.60 | 180 | 28.70 | 507 | 31.79 | 884 | 34.89 | 1047 |
| 19.44 | 1 | 22.54 | 36 | 25.63 | 183 | 28.73 | 515 | 31.82 | 893 | 34.92 | 1043 |
| 19.47 | 2 | 22.57 | 36 | 25.66 | 188 | 28.76 | 516 | 31.86 | 889 | 34.95 | 1051 |
| 19.50 | 3 | 22.60 | 34 | 25.69 | 190 | 28.79 | 516 | 31.89 | 895 | 34.98 | 1052 |
| 19.53 | 2 | 22.63 | 35 | 25.73 | 194 | 28.82 | 521 | 31.92 | 903 | 35.01 | 1050 |
| 19.56 | 2 | 22.66 | 36 | 25.76 | 197 | 28.85 | 524 | 31.95 | 903 | 35.04 | 1057 |
| 19.59 | 2 | 22.69 | 35 | 25.79 | 199 | 28.88 | 525 | 31.98 | 911 | 35.07 | 1057 |
| 19.63 | 2 | 22.72 | 36 | 25.82 | 200 | 28.91 | 534 | 32.01 | 915 | 35.11 | 1060 |
| 19.66 | 2 | 22.75 | 36 | 25.85 | 201 | 28.95 | 539 | 32.04 | 916 | 35.14 | 1062 |
| 19.69 | 4 | 22.78 | 36 | 25.88 | 202 | 28.98 | 545 | 32.07 | 912 | 35.17 | 1063 |
| 19.72 | 5 | 22.82 | 37 | 25.91 | 206 | 29.01 | 552 | 32.10 | 914 | 35.20 | 1061 |
| 19.75 | 5 | 22.85 | 38 | 25.94 | 213 | 29.04 | 555 | 32.13 | 916 | 35.23 | 1065 |
| 19.78 | 4 | 22.88 | 39 | 25.97 | 214 | 29.07 | 556 | 32.16 | 919 | 35.26 | 1067 |
| 19.81 | 3 | 22.91 | 40 | 26.00 | 213 | 29.10 | 561 | 32.20 | 926 | 35.29 | 1057 |
| 19.84 | 3 | 22.94 | 43 | 26.04 | 216 | 29.13 | 569 | 32.23 | 926 | 35.32 | 1056 |
| 19.87 | 4 | 22.97 | 42 | 26.07 | 217 | 29.16 | 568 | 32.26 | 925 | 35.35 | 1048 |
| 19.90 | 4 | 23.00 | 42 | 26.10 | 220 | 29.19 | 575 | 32.29 | 925 | 35.38 | 1043 |
| 19.94 | 4 | 23.03 | 45 | 26.13 | 222 | 29.22 | 583 | 32.32 | 929 | 35.41 | 1039 |
| 19.97 | 4 | 23.06 | 45 | 26.16 | 224 | 29.26 | 579 | 32.35 | 929 | 35.45 | 1037 |
| 20.00 | 5 | 23.09 | 45 | 26.19 | 230 | 29.29 | 580 | 32.38 | 936 | 35.48 | 1035 |
| 20.03 | 4 | 23.12 | 48 | 26.22 | 231 | 29.32 | 582 | 32.41 | 948 | 35.51 | 1031 |
| 20.06 | 4 | 23.16 | 48 | 26.25 | 234 | 29.35 | 587 | 32.44 | 956 | 35.54 | 1038 |
| 20.09 | 4 | 23.19 | 48 | 26.28 | 236 | 29.38 | 588 | 32.47 | 959 | 35.57 | 1038 |
| 20.12 | 7 | 23.22 | 49 | 26.31 | 236 | 29.41 | 594 | 32.51 | 961 | 35.60 | 1039 |
| 20.15 | 6 | 23.25 | 50 | 26.35 | 241 | 29.44 | 601 | 32.54 | 963 | 35.63 | 1036 |
| 20.18 | 5 | 23.28 | 50 | 26.38 | 247 | 29.47 | 599 | 32.57 | 957 | 35.66 | 1036 |
| 20.21 | 5 | 23.31 | 52 | 26.41 | 251 | 29.50 | 606 | 32.60 | 959 | 35.69 | 1037 |
| 20.24 | 5 | 23.34 | 54 | 26.44 | 252 | 29.53 | 603 | 32.63 | 960 | 35.72 | 1028 |
| 20.28 | 5 | 23.37 | 53 | 26.47 | 257 | 29.56 | 607 | 32.66 | 959 | 35.76 | 1032 |
| 20.31 | 4 | 23.40 | 54 | 26.50 | 262 | 29.60 | 617 | 32.69 | 967 | 35.79 | 1026 |
| 20.34 | 4 | 23.43 | 58 | 26.53 | 264 | 29.63 | 624 | 32.72 | 975 | 35.82 | 1028 |
| 20.37 | 5 | 23.47 | 57 | 26.56 | 267 | 29.66 | 632 | 32.75 | 972 | 35.85 | 1028 |
| 20.40 | 5 | 23.50 | 56 | 26.59 | 268 | 29.69 | 635 | 32.78 | 969 | 35.88 | 1020 |
| 20.43 | 6 | 23.53 | 58 | 26.62 | 273 | 29.72 | 639 | 32.81 | 974 | 35.91 | 1014 |
| 20.46 | 6 | 23.56 | 60 | 26.65 | 282 | 29.75 | 640 | 32.85 | 979 | 35.94 | 1009 |
| 20.49 | 7 | 23.59 | 61 | 26.69 | 281 | 29.78 | 646 | 32.88 | 991 | 35.97 | 1007 |
| 20.52 | 9 | 23.62 | 61 | 26.72 | 283 | 29.81 | 655 | 32.91 | 1001 | 36.00 | 1009 |
| 20.55 | 10 | 23.65 | 60 | 26.75 | 285 | 29.84 | 657 | 32.94 | 1004 | 36.03 | 1002 |
| 20.59 | 11 | 23.68 | 62 | 26.78 | 286 | 29.87 | 665 | 32.97 | 1014 | 36.06 | 1000 |
| 20.62 | 11 | 23.71 | 64 | 26.81 | 287 | 29.91 | 674 | 33.00 | 1018 | 36.10 | 994 |
| 20.65 | 11 | 23.74 | 67 | 26.84 | 287 | 29.94 | 679 | 33.03 | 1021 | 36.13 | 995 |
| 20.68 | 11 | 23.78 | 66 | 26.87 | 289 | 29.97 | 686 | 33.06 | 1010 | 36.16 | 990 |
| 20.71 | 11 | 23.81 | 68 | 26.90 | 293 | 30.00 | 684 | 33.09 | 1007 | 36.19 | 989 |

Figura B.26: N_40 , distanza sorgente rivelatore = 200 cm.

(segue) N40, distanza sorgente rivelatore = 200 cm

| E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi |
|------------|----------|------------|----------|------------|----------|------------|----------|------------|----------|------------|----------|------------|----------|
| 20,74 | 10 | 23,84 | 70 | 26,93 | 298 | 30,03 | 688 | 33,12 | 1008 | 36,22 | 992 | 39,31 | 367 |
| 20,77 | 11 | 23,87 | 71 | 26,96 | 299 | 30,06 | 697 | 33,16 | 1008 | 36,25 | 994 | 39,34 | 351 |
| 20,80 | 10 | 23,90 | 71 | 27,00 | 302 | 30,09 | 699 | 33,19 | 1005 | 36,28 | 990 | 39,38 | 338 |
| 20,83 | 12 | 23,93 | 75 | 27,03 | 306 | 30,12 | 698 | 33,22 | 998 | 36,31 | 996 | 39,41 | 323 |
| 20,86 | 10 | 23,96 | 77 | 27,06 | 312 | 30,15 | 696 | 33,25 | 995 | 36,34 | 993 | 39,44 | 308 |
| 20,90 | 12 | 23,99 | 79 | 27,09 | 317 | 30,18 | 695 | 33,28 | 998 | 36,37 | 1000 | 39,47 | 290 |
| 20,93 | 12 | 24,02 | 78 | 27,12 | 325 | 30,21 | 699 | 33,31 | 998 | 36,41 | 996 | 39,50 | 274 |
| 20,96 | 13 | 24,05 | 79 | 27,15 | 330 | 30,25 | 698 | 33,34 | 999 | 36,44 | 991 | 39,53 | 258 |
| 20,99 | 13 | 24,08 | 82 | 27,18 | 336 | 30,28 | 699 | 33,37 | 996 | 36,47 | 987 | 39,56 | 238 |
| 21,02 | 15 | 24,12 | 83 | 27,21 | 337 | 30,31 | 694 | 33,40 | 998 | 36,50 | 987 | 39,59 | 218 |
| 21,05 | 16 | 24,15 | 85 | 27,24 | 342 | 30,34 | 698 | 33,43 | 1008 | 36,53 | 986 | 39,62 | 204 |
| 21,08 | 17 | 24,18 | 87 | 27,27 | 343 | 30,37 | 697 | 33,46 | 1015 | 36,56 | 977 | 39,65 | 185 |
| 21,11 | 14 | 24,21 | 90 | 27,30 | 347 | 30,40 | 702 | 33,50 | 1018 | 36,59 | 963 | 39,69 | 168 |
| 21,14 | 13 | 24,24 | 90 | 27,34 | 349 | 30,43 | 705 | 33,53 | 1026 | 36,62 | 961 | 39,72 | 149 |
| 21,17 | 12 | 24,27 | 91 | 27,37 | 353 | 30,46 | 708 | 33,56 | 1022 | 36,65 | 953 | 39,75 | 131 |
| 21,20 | 12 | 24,30 | 92 | 27,40 | 354 | 30,49 | 715 | 33,59 | 1024 | 36,68 | 948 | 39,78 | 113 |
| 21,24 | 11 | 24,33 | 96 | 27,43 | 356 | 30,52 | 719 | 33,62 | 1026 | 36,71 | 940 | 39,81 | 99 |
| 21,27 | 9 | 24,36 | 98 | 27,46 | 356 | 30,56 | 721 | 33,65 | 1029 | 36,75 | 939 | 39,84 | 82 |
| 21,30 | 9 | 24,39 | 98 | 27,49 | 358 | 30,59 | 726 | 33,68 | 1035 | 36,78 | 940 | 39,87 | 68 |
| 21,33 | 10 | 24,43 | 98 | 27,52 | 356 | 30,62 | 726 | 33,71 | 1038 | 36,81 | 934 | 39,90 | 56 |
| 21,36 | 9 | 24,46 | 99 | 27,55 | 359 | 30,65 | 733 | 33,74 | 1040 | 36,84 | 928 | 39,93 | 46 |
| 21,39 | 9 | 24,49 | 100 | 27,58 | 361 | 30,68 | 737 | 33,77 | 1042 | 36,87 | 924 | 39,96 | 36 |
| 21,42 | 9 | 24,52 | 101 | 27,61 | 368 | 30,71 | 745 | 33,81 | 1041 | 36,90 | 919 | 39,99 | 28 |
| 21,45 | 10 | 24,55 | 101 | 27,65 | 371 | 30,74 | 746 | 33,84 | 1046 | 36,93 | 921 | 40,03 | 21 |
| 21,48 | 11 | 24,58 | 105 | 27,68 | 372 | 30,77 | 754 | 33,87 | 1036 | 36,96 | 915 | 40,06 | 14 |
| 21,51 | 12 | 24,61 | 105 | 27,71 | 376 | 30,80 | 761 | 33,90 | 1035 | 36,99 | 913 | 40,09 | 10 |
| 21,55 | 13 | 24,64 | 109 | 27,74 | 380 | 30,83 | 766 | 33,93 | 1033 | 37,02 | 909 | 40,12 | 7 |
| 21,58 | 14 | 24,67 | 109 | 27,77 | 380 | 30,86 | 770 | 33,96 | 1030 | 37,05 | 909 | 40,15 | 5 |
| 21,61 | 15 | 24,70 | 111 | 27,80 | 386 | 30,90 | 778 | 33,99 | 1029 | 37,09 | 910 | 40,18 | 4 |
| 21,64 | 17 | 24,73 | 114 | 27,83 | 395 | 30,93 | 777 | 34,02 | 1026 | 37,12 | 902 | 40,21 | 3 |
| 21,67 | 17 | 24,77 | 120 | 27,86 | 402 | 30,96 | 789 | 34,05 | 1031 | 37,15 | 901 | 40,24 | 3 |
| 21,70 | 17 | 24,80 | 124 | 27,89 | 408 | 30,99 | 795 | 34,08 | 1034 | 37,18 | 899 | 40,27 | 3 |
| 21,73 | 17 | 24,83 | 125 | 27,92 | 413 | 31,02 | 797 | 34,11 | 1027 | 37,21 | 893 | 40,30 | 2 |
| 21,76 | 17 | 24,86 | 129 | 27,95 | 415 | 31,05 | 802 | 34,15 | 1028 | 37,24 | 888 | 40,33 | 3 |
| 21,79 | 18 | 24,89 | 132 | 27,99 | 416 | 31,08 | 803 | 34,18 | 1028 | 37,27 | 889 | 40,37 | 3 |
| 21,82 | 17 | 24,92 | 132 | 28,02 | 420 | 31,11 | 805 | 34,21 | 1035 | 37,30 | 884 | 40,40 | 3 |
| 21,86 | 16 | 24,95 | 132 | 28,05 | 424 | 31,14 | 808 | 34,24 | 1041 | 37,33 | 880 | 40,43 | 3 |
| 21,89 | 17 | 24,98 | 132 | 28,08 | 426 | 31,17 | 811 | 34,27 | 1044 | 37,36 | 872 | 40,46 | 3 |
| 21,92 | 18 | 25,01 | 135 | 28,11 | 433 | 31,21 | 820 | 34,30 | 1046 | 37,40 | 865 | 40,49 | 3 |
| 21,95 | 17 | 25,04 | 137 | 28,14 | 435 | 31,24 | 823 | 34,33 | 1043 | 37,43 | 859 | 40,52 | 3 |
| 21,98 | 17 | 25,08 | 138 | 28,17 | 433 | 31,27 | 829 | 34,36 | 1045 | 37,46 | 854 | 40,55 | 3 |
| 22,01 | 17 | 25,11 | 136 | 28,20 | 436 | 31,30 | 832 | 34,39 | 1040 | 37,49 | 852 | 40,58 | 3 |
| 22,04 | 19 | 25,14 | 138 | 28,23 | 438 | 31,33 | 835 | 34,42 | 1039 | 37,52 | 846 | 40,61 | 3 |
| 22,07 | 20 | 25,17 | 142 | 28,26 | 439 | 31,36 | 843 | 34,46 | 1045 | 37,55 | 839 | 40,64 | 3 |

B.2.3 Serie H

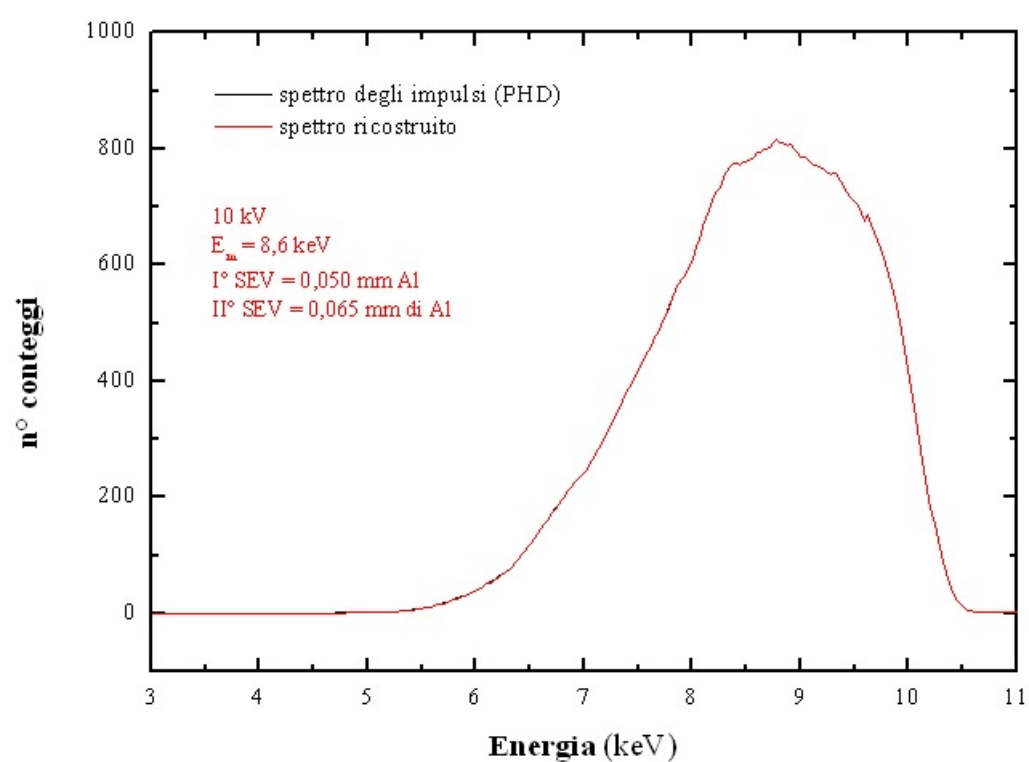
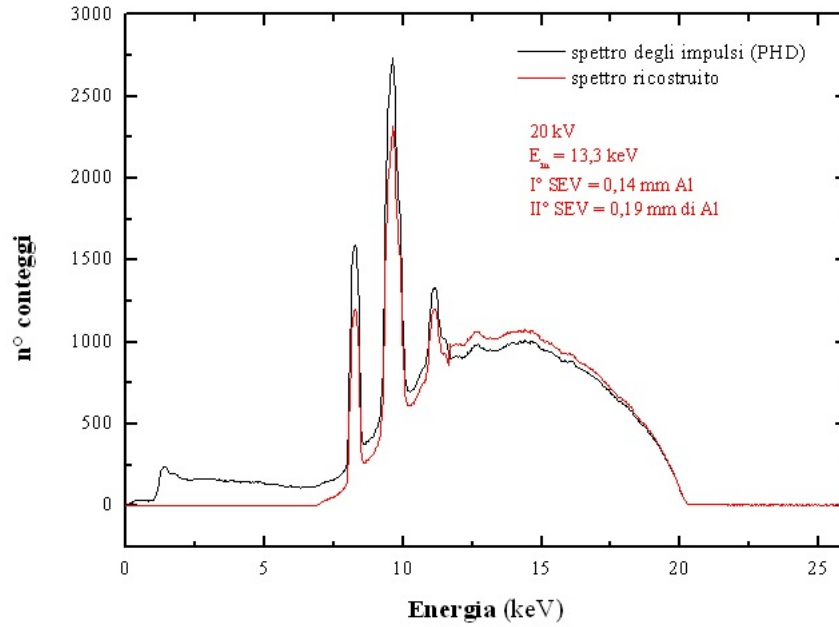


Figura B.27: H10, distanza sorgente rivelatore = 200 cm.

| E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi |
|---------|----------|---------|----------|---------|----------|---------|----------|---------|----------|
| 3,02 | 0 | 4,57 | 0 | 6,12 | 50 | 7,67 | 480 | 9,22 | 764 |
| 3,05 | 0 | 4,60 | 0 | 6,15 | 53 | 7,70 | 487 | 9,25 | 758 |
| 3,08 | 0 | 4,63 | 0 | 6,18 | 57 | 7,73 | 505 | 9,28 | 755 |
| 3,11 | 0 | 4,66 | 0 | 6,21 | 61 | 7,76 | 514 | 9,31 | 758 |
| 3,14 | 0 | 4,69 | 0 | 6,24 | 66 | 7,79 | 528 | 9,34 | 756 |
| 3,17 | 0 | 4,72 | 0 | 6,27 | 70 | 7,82 | 542 | 9,37 | 745 |
| 3,20 | 0 | 4,75 | 0 | 6,30 | 75 | 7,85 | 555 | 9,40 | 736 |
| 3,24 | 0 | 4,78 | 0 | 6,33 | 80 | 7,88 | 567 | 9,43 | 725 |
| 3,27 | 0 | 4,82 | 1 | 6,37 | 86 | 7,92 | 579 | 9,46 | 717 |
| 3,30 | 0 | 4,85 | 1 | 6,40 | 92 | 7,95 | 586 | 9,50 | 710 |
| 3,33 | 0 | 4,88 | 1 | 6,43 | 100 | 7,98 | 597 | 9,53 | 702 |
| 3,36 | 0 | 4,91 | 1 | 6,46 | 108 | 8,01 | 612 | 9,56 | 689 |
| 3,39 | 0 | 4,94 | 1 | 6,49 | 115 | 8,04 | 632 | 9,59 | 675 |
| 3,42 | 0 | 4,97 | 1 | 6,52 | 121 | 8,07 | 643 | 9,62 | 688 |
| 3,45 | 0 | 5,00 | 1 | 6,55 | 129 | 8,10 | 667 | 9,65 | 669 |
| 3,48 | 0 | 5,03 | 1 | 6,58 | 137 | 8,13 | 680 | 9,68 | 656 |
| 3,51 | 0 | 5,06 | 1 | 6,61 | 145 | 8,16 | 695 | 9,71 | 642 |
| 3,55 | 0 | 5,09 | 1 | 6,64 | 153 | 8,19 | 712 | 9,74 | 627 |
| 3,58 | 0 | 5,13 | 2 | 6,68 | 163 | 8,22 | 724 | 9,77 | 612 |
| 3,61 | 0 | 5,16 | 2 | 6,71 | 172 | 8,26 | 733 | 9,81 | 592 |
| 3,64 | 0 | 5,19 | 2 | 6,74 | 180 | 8,29 | 750 | 9,84 | 564 |
| 3,67 | 0 | 5,22 | 2 | 6,77 | 186 | 8,32 | 761 | 9,87 | 542 |
| 3,70 | 0 | 5,25 | 3 | 6,80 | 194 | 8,35 | 770 | 9,90 | 514 |
| 3,73 | 0 | 5,28 | 3 | 6,83 | 202 | 8,38 | 775 | 9,93 | 489 |
| 3,76 | 0 | 5,31 | 3 | 6,86 | 210 | 8,41 | 776 | 9,96 | 454 |
| 3,79 | 0 | 5,34 | 4 | 6,89 | 217 | 8,44 | 771 | 9,99 | 422 |
| 3,82 | 0 | 5,37 | 5 | 6,92 | 224 | 8,47 | 778 | 10,02 | 386 |
| 3,86 | 0 | 5,40 | 5 | 6,95 | 232 | 8,50 | 777 | 10,05 | 354 |
| 3,89 | 0 | 5,44 | 6 | 6,99 | 239 | 8,53 | 780 | 10,08 | 316 |
| 3,92 | 0 | 5,47 | 7 | 7,02 | 246 | 8,57 | 784 | 10,12 | 280 |
| 3,95 | 0 | 5,50 | 8 | 7,05 | 254 | 8,60 | 794 | 10,15 | 245 |
| 3,98 | 0 | 5,53 | 9 | 7,08 | 263 | 8,63 | 794 | 10,18 | 215 |
| 4,01 | 0 | 5,56 | 10 | 7,11 | 274 | 8,66 | 799 | 10,21 | 181 |
| 4,04 | 0 | 5,59 | 11 | 7,14 | 283 | 8,69 | 799 | 10,24 | 154 |
| 4,07 | 0 | 5,62 | 13 | 7,17 | 292 | 8,72 | 801 | 10,27 | 125 |
| 4,10 | 0 | 5,65 | 14 | 7,20 | 305 | 8,75 | 810 | 10,30 | 102 |
| 4,13 | 0 | 5,68 | 16 | 7,23 | 314 | 8,78 | 817 | 10,33 | 78 |
| 4,17 | 0 | 5,71 | 17 | 7,26 | 328 | 8,81 | 811 | 10,36 | 60 |
| 4,20 | 0 | 5,75 | 18 | 7,30 | 341 | 8,84 | 811 | 10,39 | 44 |
| 4,23 | 0 | 5,78 | 21 | 7,33 | 353 | 8,88 | 806 | 10,42 | 32 |
| 4,26 | 0 | 5,81 | 23 | 7,36 | 366 | 8,91 | 808 | 10,46 | 22 |
| 4,29 | 0 | 5,84 | 25 | 7,39 | 377 | 8,94 | 799 | 10,49 | 15 |
| 4,32 | 0 | 5,87 | 28 | 7,42 | 389 | 8,97 | 795 | 10,52 | 9 |
| 4,35 | 0 | 5,90 | 30 | 7,45 | 397 | 9,00 | 787 | 10,55 | 5 |
| 4,38 | 0 | 5,93 | 33 | 7,48 | 409 | 9,03 | 786 | 10,58 | 3 |
| 4,41 | 0 | 5,96 | 35 | 7,51 | 421 | 9,06 | 783 | 10,61 | 2 |
| 4,44 | 0 | 5,99 | 38 | 7,54 | 429 | 9,09 | 777 | 10,64 | 1 |
| 4,48 | 0 | 6,02 | 41 | 7,57 | 444 | 9,12 | 771 | 10,67 | 1 |
| 4,51 | 0 | 6,06 | 44 | 7,61 | 455 | 9,15 | 771 | 10,70 | 1 |
| 4,54 | 0 | 6,09 | 48 | 7,64 | 468 | 9,19 | 767 | 10,73 | 1 |



| E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi |
|---------|----------|---------|----------|---------|----------|---------|----------|---------|----------|---------|----------|---------|----------|
| 6,80 | 0 | 8,66 | 266 | 10,52 | 672 | 12,38 | 865 | 14,24 | 954 | 16,09 | 848 | 17,95 | 602 |
| 6,83 | 0 | 8,69 | 275 | 10,55 | 683 | 12,41 | 874 | 14,27 | 949 | 16,13 | 850 | 17,98 | 603 |
| 6,86 | 3 | 8,72 | 278 | 10,58 | 696 | 12,44 | 882 | 14,30 | 950 | 16,16 | 842 | 18,01 | 600 |
| 6,89 | 5 | 8,75 | 283 | 10,61 | 708 | 12,47 | 882 | 14,33 | 948 | 16,19 | 835 | 18,05 | 598 |
| 6,92 | 8 | 8,78 | 288 | 10,64 | 718 | 12,50 | 893 | 14,36 | 953 | 16,22 | 831 | 18,08 | 591 |
| 6,95 | 10 | 8,81 | 294 | 10,67 | 731 | 12,53 | 898 | 14,39 | 960 | 16,25 | 823 | 18,11 | 585 |
| 6,99 | 12 | 8,84 | 299 | 10,70 | 738 | 12,56 | 905 | 14,42 | 955 | 16,28 | 821 | 18,14 | 584 |
| 7,02 | 14 | 8,88 | 304 | 10,73 | 751 | 12,59 | 911 | 14,45 | 956 | 16,31 | 813 | 18,17 | 577 |
| 7,05 | 17 | 8,91 | 308 | 10,77 | 756 | 12,62 | 915 | 14,48 | 952 | 16,34 | 812 | 18,20 | 568 |
| 7,08 | 22 | 8,94 | 316 | 10,80 | 766 | 12,66 | 917 | 14,51 | 950 | 16,37 | 809 | 18,23 | 568 |
| 7,11 | 24 | 8,97 | 324 | 10,83 | 772 | 12,69 | 915 | 14,55 | 948 | 16,40 | 808 | 18,26 | 565 |
| 7,14 | 27 | 9,00 | 333 | 10,86 | 793 | 12,72 | 919 | 14,58 | 946 | 16,44 | 807 | 18,29 | 556 |
| 7,17 | 31 | 9,03 | 344 | 10,89 | 836 | 12,75 | 913 | 14,61 | 959 | 16,47 | 801 | 18,32 | 544 |
| 7,20 | 33 | 9,06 | 357 | 10,92 | 887 | 12,78 | 908 | 14,64 | 959 | 16,50 | 798 | 18,36 | 535 |
| 7,23 | 37 | 9,09 | 367 | 10,95 | 969 | 12,81 | 902 | 14,67 | 957 | 16,53 | 801 | 18,39 | 527 |
| 7,26 | 37 | 9,12 | 382 | 10,98 | 1050 | 12,84 | 899 | 14,70 | 951 | 16,56 | 798 | 18,42 | 527 |
| 7,30 | 40 | 9,15 | 401 | 11,01 | 1112 | 12,87 | 899 | 14,73 | 949 | 16,59 | 794 | 18,45 | 521 |
| 7,33 | 42 | 9,19 | 431 | 11,04 | 1161 | 12,90 | 898 | 14,76 | 949 | 16,62 | 792 | 18,48 | 511 |
| 7,36 | 45 | 9,22 | 483 | 11,08 | 1186 | 12,93 | 894 | 14,79 | 948 | 16,65 | 788 | 18,51 | 504 |
| 7,39 | 47 | 9,25 | 558 | 11,11 | 1199 | 12,97 | 893 | 14,82 | 941 | 16,68 | 784 | 18,54 | 502 |
| 7,42 | 49 | 9,28 | 670 | 11,14 | 1197 | 13,00 | 887 | 14,86 | 938 | 16,71 | 779 | 18,57 | 489 |
| 7,45 | 52 | 9,31 | 849 | 11,17 | 1199 | 13,03 | 888 | 14,89 | 932 | 16,74 | 774 | 18,60 | 484 |
| 7,48 | 52 | 9,34 | 1092 | 11,20 | 1188 | 13,06 | 885 | 14,92 | 932 | 16,78 | 776 | 18,63 | 481 |
| 7,51 | 54 | 9,37 | 1372 | 11,23 | 1158 | 13,09 | 887 | 14,95 | 918 | 16,81 | 769 | 18,67 | 478 |
| 7,54 | 56 | 9,40 | 1625 | 11,26 | 1122 | 13,12 | 891 | 14,98 | 916 | 16,84 | 770 | 18,70 | 475 |
| 7,57 | 58 | 9,43 | 1824 | 11,29 | 1065 | 13,15 | 894 | 15,01 | 913 | 16,87 | 764 | 18,73 | 470 |
| 7,61 | 64 | 9,46 | 1949 | 11,32 | 1010 | 13,18 | 892 | 15,04 | 912 | 16,90 | 761 | 18,76 | 465 |
| 7,64 | 68 | 9,50 | 2032 | 11,35 | 971 | 13,21 | 893 | 15,07 | 916 | 16,93 | 755 | 18,79 | 460 |
| 7,67 | 72 | 9,53 | 2086 | 11,39 | 947 | 13,24 | 890 | 15,10 | 910 | 16,96 | 752 | 18,82 | 452 |
| 7,70 | 75 | 9,56 | 2139 | 11,42 | 934 | 13,28 | 889 | 15,13 | 904 | 16,99 | 750 | 18,85 | 444 |
| 7,73 | 80 | 9,59 | 2198 | 11,45 | 927 | 13,31 | 888 | 15,17 | 910 | 17,02 | 751 | 18,88 | 435 |
| 7,76 | 85 | 9,62 | 2310 | 11,48 | 931 | 13,34 | 892 | 15,20 | 907 | 17,05 | 745 | 18,91 | 432 |
| 7,79 | 88 | 9,65 | 2322 | 11,51 | 930 | 13,37 | 890 | 15,23 | 911 | 17,09 | 736 | 18,94 | 423 |
| 7,82 | 93 | 9,68 | 2257 | 11,54 | 920 | 13,40 | 893 | 15,26 | 904 | 17,12 | 731 | 18,97 | 418 |
| 7,85 | 98 | 9,71 | 2111 | 11,57 | 912 | 13,43 | 895 | 15,29 | 900 | 17,15 | 726 | 19,01 | 410 |

Figura B.28: H_2O , distanza sorgente rivelatore = 200 cm.

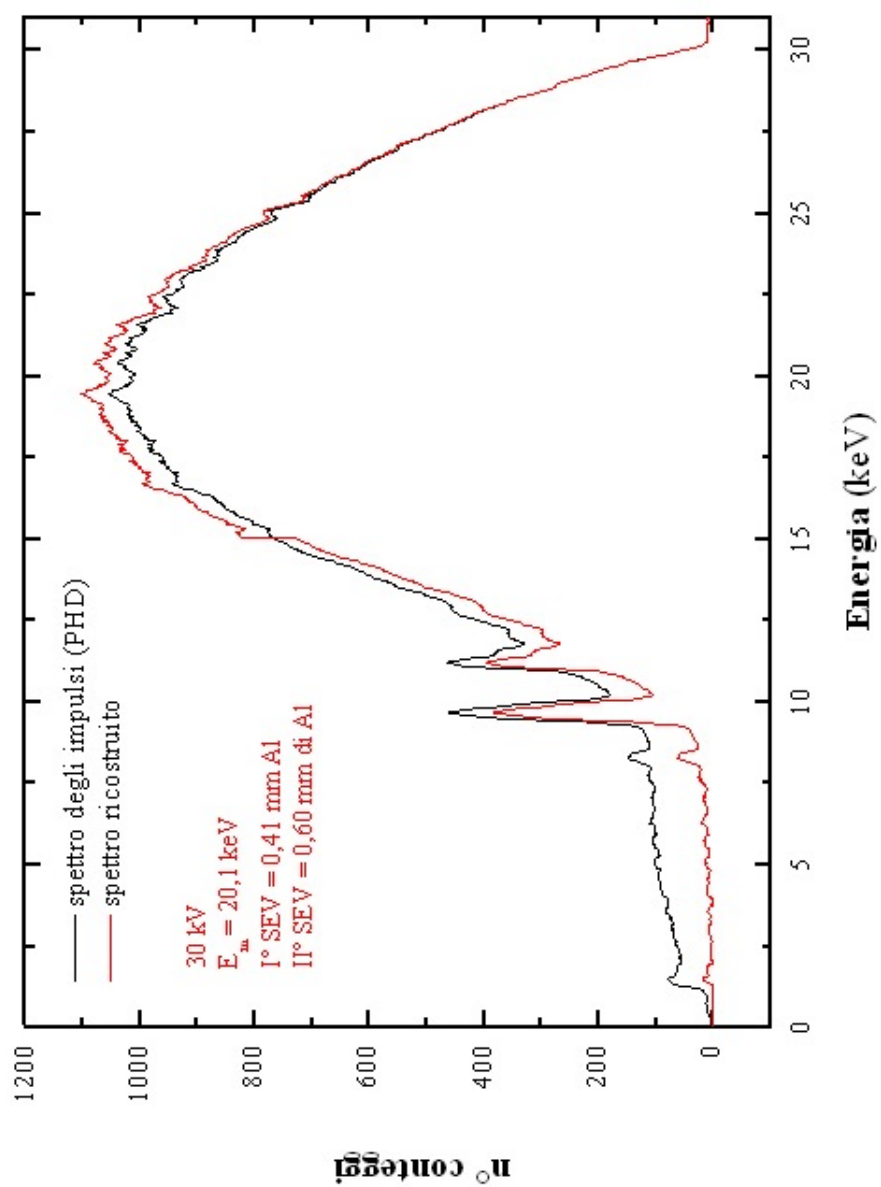


Figura B.29: *H30*, distanza sorgente rivelatore = 200 cm.

| E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi |
|------------|----------|------------|----------|------------|----------|------------|----------|------------|----------|------------|----------|------------|----------|------------|----------|------------|----------|
| 2,74 | 4 | 6,46 | 14 | 10,18 | 106 | 13,89 | 562 | 17,61 | 962 | 21,33 | 994 | 25,04 | 766 | 28,76 | 288 | | |
| 2,77 | 4 | 6,49 | 13 | 10,21 | 108 | 13,93 | 567 | 17,64 | 965 | 21,36 | 988 | 25,08 | 765 | 28,79 | 284 | | |
| 2,80 | 6 | 6,52 | 12 | 10,24 | 111 | 13,96 | 573 | 17,67 | 957 | 21,39 | 990 | 25,11 | 758 | 28,82 | 278 | | |
| 2,83 | 6 | 6,55 | 11 | 10,27 | 113 | 13,99 | 576 | 17,71 | 967 | 21,42 | 995 | 25,14 | 749 | 28,85 | 275 | | |
| 2,86 | 7 | 6,58 | 11 | 10,30 | 110 | 14,02 | 580 | 17,74 | 967 | 21,45 | 993 | 25,17 | 744 | 28,88 | 273 | | |
| 2,89 | 7 | 6,61 | 10 | 10,33 | 113 | 14,05 | 583 | 17,77 | 963 | 21,48 | 997 | 25,20 | 738 | 28,91 | 272 | | |
| 2,93 | 6 | 6,64 | 9 | 10,36 | 119 | 14,08 | 587 | 17,80 | 964 | 21,51 | 1007 | 25,23 | 733 | 28,95 | 267 | | |
| 2,96 | 8 | 6,68 | 11 | 10,39 | 124 | 14,11 | 591 | 17,83 | 965 | 21,55 | 1004 | 25,26 | 725 | 28,98 | 264 | | |
| 2,99 | 7 | 6,71 | 10 | 10,42 | 126 | 14,14 | 599 | 17,86 | 970 | 21,58 | 997 | 25,29 | 719 | 29,01 | 257 | | |
| 3,02 | 6 | 6,74 | 11 | 10,46 | 128 | 14,17 | 603 | 17,89 | 965 | 21,61 | 990 | 25,32 | 711 | 29,04 | 251 | | |
| 3,05 | 6 | 6,77 | 13 | 10,49 | 130 | 14,20 | 610 | 17,92 | 961 | 21,64 | 989 | 25,35 | 704 | 29,07 | 245 | | |
| 3,08 | 6 | 6,80 | 13 | 10,52 | 130 | 14,24 | 618 | 17,95 | 958 | 21,67 | 983 | 25,39 | 705 | 29,10 | 242 | | |
| 3,11 | 6 | 6,83 | 14 | 10,55 | 137 | 14,27 | 621 | 17,98 | 964 | 21,70 | 983 | 25,42 | 703 | 29,13 | 237 | | |
| 3,14 | 5 | 6,86 | 15 | 10,58 | 139 | 14,30 | 625 | 18,01 | 975 | 21,73 | 983 | 25,45 | 705 | 29,16 | 229 | | |
| 3,17 | 4 | 6,89 | 15 | 10,61 | 143 | 14,33 | 630 | 18,05 | 971 | 21,76 | 975 | 25,48 | 707 | 29,19 | 221 | | |
| 3,20 | 4 | 6,92 | 16 | 10,64 | 152 | 14,36 | 637 | 18,08 | 973 | 21,79 | 969 | 25,51 | 703 | 29,22 | 216 | | |
| 3,24 | 5 | 6,95 | 17 | 10,67 | 154 | 14,39 | 646 | 18,11 | 978 | 21,82 | 965 | 25,54 | 701 | 29,26 | 209 | | |
| 3,27 | 6 | 6,99 | 18 | 10,70 | 157 | 14,42 | 653 | 18,14 | 976 | 21,86 | 949 | 25,57 | 696 | 29,29 | 207 | | |
| 3,30 | 6 | 7,02 | 15 | 10,73 | 159 | 14,45 | 661 | 18,17 | 981 | 21,89 | 943 | 25,60 | 695 | 29,32 | 200 | | |
| 3,33 | 3 | 7,05 | 16 | 10,77 | 167 | 14,48 | 665 | 18,20 | 984 | 21,92 | 945 | 25,63 | 693 | 29,35 | 196 | | |
| 3,36 | 5 | 7,08 | 14 | 10,80 | 172 | 14,51 | 670 | 18,23 | 985 | 21,95 | 947 | 25,66 | 690 | 29,38 | 191 | | |
| 3,39 | 5 | 7,11 | 15 | 10,83 | 177 | 14,55 | 678 | 18,26 | 990 | 21,98 | 945 | 25,69 | 686 | 29,41 | 185 | | |
| 3,42 | 5 | 7,14 | 14 | 10,86 | 189 | 14,58 | 678 | 18,29 | 990 | 22,01 | 945 | 25,73 | 682 | 29,44 | 180 | | |
| 3,45 | 7 | 7,17 | 14 | 10,89 | 207 | 14,61 | 687 | 18,32 | 986 | 22,04 | 939 | 25,76 | 679 | 29,47 | 172 | | |
| 3,48 | 8 | 7,20 | 13 | 10,92 | 236 | 14,64 | 685 | 18,36 | 987 | 22,07 | 933 | 25,79 | 676 | 29,50 | 165 | | |
| 3,51 | 10 | 7,23 | 12 | 10,95 | 275 | 14,67 | 693 | 18,39 | 990 | 22,10 | 941 | 25,82 | 676 | 29,53 | 160 | | |
| 3,55 | 8 | 7,26 | 11 | 10,98 | 312 | 14,70 | 697 | 18,42 | 991 | 22,13 | 946 | 25,85 | 674 | 29,56 | 154 | | |
| 3,58 | 7 | 7,30 | 12 | 11,01 | 342 | 14,73 | 699 | 18,45 | 995 | 22,16 | 946 | 25,88 | 667 | 29,60 | 146 | | |
| 3,61 | 8 | 7,33 | 11 | 11,04 | 363 | 14,76 | 703 | 18,48 | 994 | 22,20 | 952 | 25,91 | 660 | 29,63 | 136 | | |
| 3,64 | 6 | 7,36 | 14 | 11,08 | 378 | 14,79 | 707 | 18,51 | 993 | 22,23 | 954 | 25,94 | 660 | 29,66 | 128 | | |
| 3,67 | 4 | 7,39 | 15 | 11,11 | 382 | 14,82 | 708 | 18,54 | 994 | 22,26 | 953 | 25,97 | 659 | 29,69 | 122 | | |
| 3,70 | 2 | 7,42 | 17 | 11,14 | 388 | 14,86 | 715 | 18,57 | 1004 | 22,29 | 951 | 26,00 | 657 | 29,72 | 115 | | |
| 3,73 | 2 | 7,45 | 18 | 11,17 | 396 | 14,89 | 717 | 18,60 | 999 | 22,32 | 955 | 26,04 | 653 | 29,75 | 105 | | |
| 3,76 | 3 | 7,48 | 21 | 11,20 | 393 | 14,92 | 725 | 18,63 | 1004 | 22,35 | 954 | 26,07 | 649 | 29,78 | 95 | | |
| 3,79 | 1 | 7,51 | 20 | 11,23 | 384 | 14,95 | 723 | 18,67 | 1006 | 22,38 | 958 | 26,10 | 644 | 29,81 | 87 | | |
| 3,82 | 2 | 7,54 | 22 | 11,26 | 369 | 14,98 | 730 | 18,70 | 1000 | 22,41 | 958 | 26,13 | 635 | 29,84 | 79 | | |
| 3,86 | 0 | 7,57 | 21 | 11,29 | 350 | 15,01 | 733 | 18,73 | 1008 | 22,44 | 950 | 26,16 | 629 | 29,87 | 72 | | |
| 3,89 | 1 | 7,61 | 24 | 11,32 | 331 | 15,04 | 735 | 18,76 | 1012 | 22,47 | 948 | 26,19 | 627 | 29,91 | 62 | | |
| 3,92 | 2 | 7,64 | 23 | 11,35 | 322 | 15,07 | 734 | 18,79 | 1008 | 22,51 | 940 | 26,22 | 627 | 29,94 | 54 | | |
| 3,95 | 2 | 7,67 | 25 | 11,39 | 318 | 15,10 | 737 | 18,82 | 1010 | 22,54 | 938 | 26,25 | 627 | 29,97 | 47 | | |
| 3,98 | 5 | 7,70 | 23 | 11,42 | 316 | 15,13 | 739 | 18,85 | 1010 | 22,57 | 935 | 26,28 | 623 | 30,00 | 39 | | |
| 4,01 | 9 | 7,73 | 25 | 11,45 | 317 | 15,17 | 742 | 18,88 | 1008 | 22,60 | 933 | 26,31 | 616 | 30,03 | 31 | | |
| 4,04 | 10 | 7,76 | 24 | 11,48 | 315 | 15,20 | 740 | 18,91 | 1007 | 22,63 | 935 | 26,35 | 616 | 30,06 | 26 | | |
| 4,07 | 10 | 7,79 | 24 | 11,51 | 312 | 15,23 | 741 | 18,94 | 1008 | 22,66 | 924 | 26,38 | 613 | 30,09 | 22 | | |
| 4,10 | 11 | 7,82 | 23 | 11,54 | 312 | 15,26 | 740 | 18,97 | 1013 | 22,69 | 924 | 26,41 | 609 | 30,12 | 18 | | |
| 4,13 | 9 | 7,85 | 22 | 11,57 | 308 | 15,29 | 744 | 19,01 | 1011 | 22,72 | 923 | 26,44 | 605 | 30,15 | 16 | | |
| 4,17 | 9 | 7,88 | 21 | 11,60 | 301 | 15,32 | 749 | 19,04 | 1010 | 22,75 | 924 | 26,47 | 603 | 30,18 | 13 | | |
| 4,20 | 11 | 7,92 | 23 | 11,63 | 290 | 15,35 | 754 | 19,07 | 1010 | 22,78 | 927 | 26,50 | 602 | 30,21 | 11 | | |
| 4,23 | 9 | 7,95 | 24 | 11,66 | 278 | 15,38 | 759 | 19,10 | 1012 | 22,82 | 927 | 26,53 | 598 | 30,25 | 10 | | |
| 4,26 | 10 | 7,98 | 24 | 11,70 | 271 | 15,41 | 769 | 19,13 | 1018 | 22,85 | 927 | 26,56 | 596 | 30,28 | 10 | | |
| 4,29 | 10 | 8,01 | 26 | 11,73 | 267 | 15,44 | 771 | 19,16 | 1022 | 22,88 | 927 | 26,59 | 593 | 30,31 | 10 | | |
| 4,32 | 9 | 8,04 | 31 | 11,76 | 268 | 15,47 | 769 | 19,19 | 1028 | 22,91 | 932 | 26,62 | 588 | 30,34 | 10 | | |
| 4,35 | 8 | 8,07 | 35 | 11,79 | 274 | 15,51 | 771 | 19,22 | 1030 | 22,94 | 928 | 26,65 | 586 | 30,37 | 10 | | |
| 4,38 | 8 | 8,10 | 42 | 11,82 | 281 | 15,54 | 776 | 19,25 | 1031 | 22,97 | 924 | 26,69 | 578 | 30,40 | 10 | | |
| 4,41 | 9 | 8,13 | 50 | 11,85 | 287 | 15,57 | 780 | 19,28 | 1034 | 23,00 | 922 | 26,72 | 575 | 30,43 | 10 | | |

(segue) H30, distanza sorgente rivelatore = 200 cm.

| E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi |
|------------|----------|------------|----------|------------|----------|------------|----------|------------|----------|------------|----------|------------|----------|------------|----------|
| 2,74 | 4 | 6,46 | 14 | 10,18 | 106 | 13,89 | 562 | 17,61 | 962 | 21,33 | 994 | 25,04 | 766 | 28,76 | 288 |
| 2,77 | 4 | 6,49 | 13 | 10,21 | 108 | 13,93 | 567 | 17,64 | 965 | 21,36 | 988 | 25,08 | 765 | 28,79 | 284 |
| 2,80 | 6 | 6,52 | 12 | 10,24 | 111 | 13,96 | 573 | 17,67 | 957 | 21,39 | 990 | 25,11 | 758 | 28,82 | 278 |
| 2,83 | 6 | 6,55 | 11 | 10,27 | 113 | 13,99 | 576 | 17,71 | 967 | 21,42 | 995 | 25,14 | 749 | 28,85 | 275 |
| 2,86 | 7 | 6,58 | 11 | 10,30 | 110 | 14,02 | 580 | 17,74 | 967 | 21,45 | 993 | 25,17 | 744 | 28,88 | 273 |
| 2,89 | 7 | 6,61 | 10 | 10,33 | 113 | 14,05 | 583 | 17,77 | 963 | 21,48 | 997 | 25,20 | 738 | 28,91 | 272 |
| 2,93 | 6 | 6,64 | 9 | 10,36 | 119 | 14,08 | 587 | 17,80 | 964 | 21,51 | 1007 | 25,23 | 733 | 28,95 | 267 |
| 2,96 | 8 | 6,68 | 11 | 10,39 | 124 | 14,11 | 591 | 17,83 | 965 | 21,55 | 1004 | 25,26 | 725 | 28,98 | 264 |
| 2,99 | 7 | 6,71 | 10 | 10,42 | 126 | 14,14 | 599 | 17,86 | 970 | 21,58 | 997 | 25,29 | 719 | 29,01 | 257 |
| 3,02 | 6 | 6,74 | 11 | 10,46 | 128 | 14,17 | 603 | 17,89 | 965 | 21,61 | 990 | 25,32 | 711 | 29,04 | 251 |
| 3,05 | 6 | 6,77 | 13 | 10,49 | 130 | 14,20 | 610 | 17,92 | 961 | 21,64 | 989 | 25,35 | 704 | 29,07 | 245 |
| 3,08 | 6 | 6,80 | 13 | 10,52 | 130 | 14,24 | 618 | 17,95 | 958 | 21,67 | 983 | 25,39 | 705 | 29,10 | 242 |
| 3,11 | 6 | 6,83 | 14 | 10,55 | 137 | 14,27 | 621 | 17,98 | 964 | 21,70 | 983 | 25,42 | 703 | 29,13 | 237 |
| 3,14 | 5 | 6,86 | 15 | 10,58 | 139 | 14,30 | 625 | 18,01 | 975 | 21,73 | 983 | 25,45 | 705 | 29,16 | 229 |
| 3,17 | 4 | 6,89 | 15 | 10,61 | 143 | 14,33 | 630 | 18,05 | 971 | 21,76 | 975 | 25,48 | 707 | 29,19 | 221 |
| 3,20 | 4 | 6,92 | 16 | 10,64 | 152 | 14,36 | 637 | 18,08 | 973 | 21,79 | 969 | 25,51 | 703 | 29,22 | 216 |
| 3,24 | 5 | 6,95 | 17 | 10,67 | 154 | 14,39 | 646 | 18,11 | 978 | 21,82 | 965 | 25,54 | 701 | 29,26 | 209 |
| 3,27 | 6 | 6,99 | 18 | 10,70 | 157 | 14,42 | 653 | 18,14 | 976 | 21,86 | 949 | 25,57 | 696 | 29,29 | 207 |
| 3,30 | 6 | 7,02 | 15 | 10,73 | 159 | 14,45 | 661 | 18,17 | 981 | 21,89 | 943 | 25,60 | 695 | 29,32 | 200 |
| 3,33 | 3 | 7,05 | 16 | 10,77 | 167 | 14,48 | 665 | 18,20 | 984 | 21,92 | 945 | 25,63 | 693 | 29,35 | 196 |
| 3,36 | 5 | 7,08 | 14 | 10,80 | 172 | 14,51 | 670 | 18,23 | 985 | 21,95 | 947 | 25,66 | 690 | 29,38 | 191 |
| 3,39 | 5 | 7,11 | 15 | 10,83 | 177 | 14,55 | 678 | 18,26 | 990 | 21,98 | 945 | 25,69 | 686 | 29,41 | 185 |
| 3,42 | 5 | 7,14 | 14 | 10,86 | 189 | 14,58 | 678 | 18,29 | 990 | 22,01 | 945 | 25,73 | 682 | 29,44 | 180 |
| 3,45 | 7 | 7,17 | 14 | 10,89 | 207 | 14,61 | 687 | 18,32 | 986 | 22,04 | 939 | 25,76 | 679 | 29,47 | 172 |
| 3,48 | 8 | 7,20 | 13 | 10,92 | 236 | 14,64 | 685 | 18,36 | 987 | 22,07 | 933 | 25,79 | 676 | 29,50 | 165 |
| 3,51 | 10 | 7,23 | 12 | 10,95 | 275 | 14,67 | 693 | 18,39 | 990 | 22,10 | 941 | 25,82 | 676 | 29,53 | 160 |
| 3,55 | 8 | 7,26 | 11 | 10,98 | 312 | 14,70 | 697 | 18,42 | 991 | 22,13 | 946 | 25,85 | 674 | 29,56 | 154 |
| 3,58 | 7 | 7,30 | 12 | 11,01 | 342 | 14,73 | 699 | 18,45 | 995 | 22,16 | 946 | 25,88 | 667 | 29,60 | 146 |
| 3,61 | 8 | 7,33 | 11 | 11,04 | 363 | 14,76 | 703 | 18,48 | 994 | 22,20 | 952 | 25,91 | 660 | 29,63 | 136 |
| 3,64 | 6 | 7,36 | 14 | 11,08 | 378 | 14,79 | 707 | 18,51 | 993 | 22,23 | 954 | 25,94 | 660 | 29,66 | 128 |
| 3,67 | 4 | 7,39 | 15 | 11,11 | 382 | 14,82 | 708 | 18,54 | 994 | 22,26 | 953 | 25,97 | 659 | 29,69 | 122 |
| 3,70 | 2 | 7,42 | 17 | 11,14 | 388 | 14,86 | 715 | 18,57 | 1004 | 22,29 | 951 | 26,00 | 657 | 29,72 | 115 |
| 3,73 | 2 | 7,45 | 18 | 11,17 | 396 | 14,89 | 717 | 18,60 | 999 | 22,32 | 955 | 26,04 | 653 | 29,75 | 105 |
| 3,76 | 3 | 7,48 | 21 | 11,20 | 393 | 14,92 | 725 | 18,63 | 1004 | 22,35 | 954 | 26,07 | 649 | 29,78 | 95 |
| 3,79 | 1 | 7,51 | 20 | 11,23 | 384 | 14,95 | 723 | 18,67 | 1006 | 22,38 | 958 | 26,10 | 644 | 29,81 | 87 |
| 3,82 | 2 | 7,54 | 22 | 11,26 | 369 | 14,98 | 730 | 18,70 | 1000 | 22,41 | 958 | 26,13 | 635 | 29,84 | 79 |
| 3,86 | 0 | 7,57 | 21 | 11,29 | 350 | 15,01 | 733 | 18,73 | 1008 | 22,44 | 950 | 26,16 | 629 | 29,87 | 72 |
| 3,89 | 1 | 7,61 | 24 | 11,32 | 331 | 15,04 | 735 | 18,76 | 1012 | 22,47 | 948 | 26,19 | 627 | 29,91 | 62 |
| 3,92 | 2 | 7,64 | 23 | 11,35 | 322 | 15,07 | 734 | 18,79 | 1008 | 22,51 | 940 | 26,22 | 627 | 29,94 | 54 |
| 3,95 | 2 | 7,67 | 25 | 11,39 | 318 | 15,10 | 737 | 18,82 | 1010 | 22,54 | 938 | 26,25 | 627 | 29,97 | 47 |
| 3,98 | 5 | 7,70 | 23 | 11,42 | 316 | 15,13 | 739 | 18,85 | 1010 | 22,57 | 935 | 26,28 | 623 | 30,00 | 39 |
| 4,01 | 9 | 7,73 | 25 | 11,45 | 317 | 15,17 | 742 | 18,88 | 1008 | 22,60 | 933 | 26,31 | 616 | 30,03 | 31 |
| 4,04 | 10 | 7,76 | 24 | 11,48 | 315 | 15,20 | 740 | 18,91 | 1007 | 22,63 | 935 | 26,35 | 616 | 30,06 | 26 |
| 4,07 | 10 | 7,79 | 24 | 11,51 | 312 | 15,23 | 741 | 18,94 | 1008 | 22,66 | 924 | 26,38 | 613 | 30,09 | 22 |
| 4,10 | 11 | 7,82 | 23 | 11,54 | 312 | 15,26 | 740 | 18,97 | 1013 | 22,69 | 924 | 26,41 | 609 | 30,12 | 18 |
| 4,13 | 9 | 7,85 | 22 | 11,57 | 308 | 15,29 | 744 | 19,01 | 1011 | 22,72 | 923 | 26,44 | 605 | 30,15 | 16 |
| 4,17 | 9 | 7,88 | 21 | 11,60 | 301 | 15,32 | 749 | 19,04 | 1010 | 22,75 | 924 | 26,47 | 603 | 30,18 | 13 |
| 4,20 | 11 | 7,92 | 23 | 11,63 | 290 | 15,35 | 754 | 19,07 | 1010 | 22,78 | 927 | 26,50 | 602 | 30,21 | 11 |
| 4,23 | 9 | 7,95 | 24 | 11,66 | 278 | 15,38 | 759 | 19,10 | 1012 | 22,82 | 927 | 26,53 | 598 | 30,25 | 10 |
| 4,26 | 10 | 7,98 | 24 | 11,70 | 271 | 15,41 | 769 | 19,13 | 1018 | 22,85 | 927 | 26,56 | 596 | 30,28 | 10 |
| 4,29 | 10 | 8,01 | 26 | 11,73 | 267 | 15,44 | 771 | 19,16 | 1022 | 22,88 | 927 | 26,59 | 593 | 30,31 | 10 |
| 4,32 | 9 | 8,04 | 31 | 11,76 | 268 | 15,47 | 769 | 19,19 | 1028 | 22,91 | 932 | 26,62 | 588 | 30,34 | 10 |
| 4,35 | 8 | 8,07 | 35 | 11,79 | 274 | 15,51 | 771 | 19,22 | 1030 | 22,94 | 928 | 26,65 | 586 | 30,37 | 10 |
| 4,38 | 8 | 8,10 | 42 | 11,82 | 281 | 15,54 | 776 | 19,25 | 1031 | 22,97 | 924 | 26,69 | 578 | 30,40 | 10 |
| 4,41 | 9 | 8,13 | 50 | 11,85 | 287 | 15,57 | 780 | 19,28 | 1034 | 23,00 | 922 | 26,72 | 575 | 30,43 | 10 |

(segue) H30, distanza sorgente rivelatore = 200 cm.

| E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi | E (keV) | conteggi |
|------------|----------|------------|----------|------------|----------|------------|----------|------------|----------|------------|----------|------------|----------|------------|----------|------------|----------|
| 4,44 | 8 | 8,16 | 55 | 11,88 | 288 | 15,60 | 787 | 19,32 | 1038 | 23,03 | 921 | 26,75 | 571 | 30,46 | 10 | | |
| 4,48 | 11 | 8,19 | 60 | 11,91 | 290 | 15,63 | 792 | 19,35 | 1040 | 23,06 | 919 | 26,78 | 568 | 30,49 | 9 | | |
| 4,51 | 9 | 8,22 | 61 | 11,94 | 296 | 15,66 | 797 | 19,38 | 1049 | 23,09 | 918 | 26,81 | 568 | 30,52 | 9 | | |
| 4,54 | 8 | 8,26 | 60 | 11,97 | 297 | 15,69 | 798 | 19,41 | 1044 | 23,12 | 913 | 26,84 | 558 | 30,56 | 9 | | |
| 4,57 | 9 | 8,29 | 59 | 12,01 | 298 | 15,72 | 803 | 19,44 | 1041 | 23,16 | 909 | 26,87 | 561 | 30,59 | 10 | | |
| 4,60 | 7 | 8,32 | 60 | 12,04 | 300 | 15,75 | 802 | 19,47 | 1041 | 23,19 | 909 | 26,90 | 556 | 30,62 | 10 | | |
| 4,63 | 8 | 8,35 | 58 | 12,07 | 298 | 15,78 | 803 | 19,50 | 1041 | 23,22 | 900 | 26,93 | 550 | 30,65 | 10 | | |
| 4,66 | 8 | 8,38 | 54 | 12,10 | 298 | 15,82 | 811 | 19,53 | 1035 | 23,25 | 889 | 26,96 | 549 | 30,68 | 9 | | |
| 4,69 | 7 | 8,41 | 50 | 12,13 | 297 | 15,85 | 816 | 19,56 | 1029 | 23,28 | 887 | 27,00 | 549 | 30,71 | 9 | | |

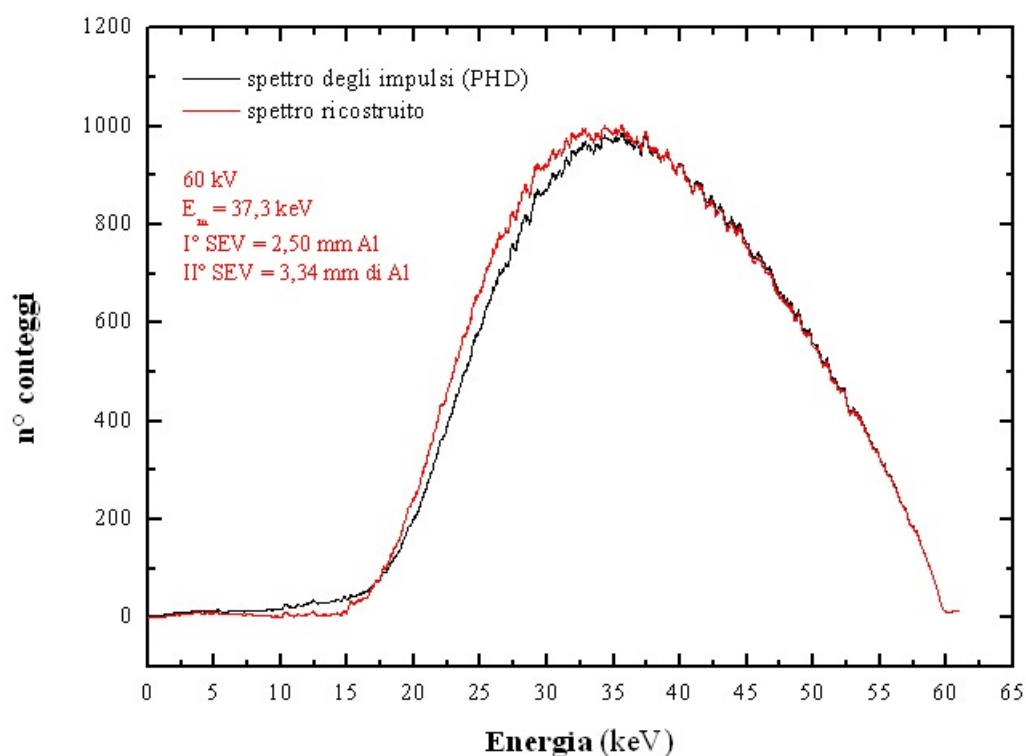


Figura B.30: H60, distanza sorgente rivelatore = 200 cm.

[illegible]

(segue) H60, distanza sorgente rivelatore = 200 cm.

| | F _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | E _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | E _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | E _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | E _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | E _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | E _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | E _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | E _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | E _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | E _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | E _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | E _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | E _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | E _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | E _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | E _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | E _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | E _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | E _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | E _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | E _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | E _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | E _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | E _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | E _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | E _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | E _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | E _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | E _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | E _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | E _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | E _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | E _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | E _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | E _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | E _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | E _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | E _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | E _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | E _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | E _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | E _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | E _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | E _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | E _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | E _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | E _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | E _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | E _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | E _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | E _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | E _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | E _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | E _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | E _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | E _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | E _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | E _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | E _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | E _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | E _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | E _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | E _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | E _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | E _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | E _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | E _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | E _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | E _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | E _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | E _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | E _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | E _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | E _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | E _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | E _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | E _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | E _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | E _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | E _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | E _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | E _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | E _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | E _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | E _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | E _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | E _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | E _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | E _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | E _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | E _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | E _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | E _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | E _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | E _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | E _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | E _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | E _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | E _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | E _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | E _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | E _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | E _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | E _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | F _{conteggi} (keV) | E _{conteggi} (keV) | F< |
|--|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|----|
|--|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|----|

| E _{conteggi} (keV) | E _{conteggi} (keV) | E _{conteggi} (keV) | E _{conteggi} (keV) | E _{conteggi} (keV) | E _{conteggi} (keV) | E _{conteggi} (keV) | E _{conteggi} (keV) | E _{conteggi} (keV) | E _{conteggi} (keV) | E _{conteggi} (keV) | E _{conteggi} (keV) | E _{conteggi} (keV) | E _{conteggi} (keV) | E _{conteggi} (keV) | E _{conteggi} (keV) | E _{conteggi} (keV) | E _{conteggi} (keV) | E _{conteggi} (keV) | E _{conteggi} (keV) |
|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| 4.10 | 8 | 10.30 | 10 | 16.50 | 42 | 22.69 | 479 | 28.88 | 885 | 35.07 | 987 | 41.26 | 881 | 47.45 | 654 | 53.64 | 393 | 59.82 | 14 |
| 4.13 | 8 | 10.33 | 11 | 16.53 | 40 | 22.72 | 481 | 28.91 | 887 | 35.11 | 992 | 41.29 | 878 | 47.48 | 649 | 53.67 | 395 | 59.85 | 13 |
| 4.17 | 8 | 10.36 | 11 | 16.56 | 45 | 22.75 | 482 | 28.95 | 899 | 35.14 | 995 | 41.33 | 881 | 47.51 | 649 | 53.70 | 393 | 59.88 | 13 |
| 4.20 | 8 | 10.39 | 11 | 16.59 | 47 | 22.78 | 482 | 28.98 | 898 | 35.17 | 991 | 41.36 | 880 | 47.54 | 651 | 53.73 | 396 | 59.91 | 12 |
| 4.23 | 8 | 10.42 | 11 | 16.62 | 49 | 22.82 | 485 | 29.01 | 903 | 35.20 | 986 | 41.39 | 877 | 47.57 | 653 | 53.76 | 393 | 59.94 | 12 |
| 4.26 | 8 | 10.46 | 11 | 16.65 | 51 | 22.85 | 485 | 29.04 | 909 | 35.23 | 985 | 41.42 | 878 | 47.60 | 654 | 53.79 | 388 | 59.97 | 11 |
| 4.29 | 7 | 10.49 | 10 | 16.68 | 52 | 22.88 | 490 | 29.07 | 916 | 35.26 | 989 | 41.45 | 873 | 47.64 | 649 | 53.82 | 386 | 60.00 | 11 |
| 4.32 | 8 | 10.52 | 9 | 16.71 | 54 | 22.91 | 496 | 29.10 | 922 | 35.29 | 984 | 41.48 | 871 | 47.67 | 645 | 53.85 | 383 | 60.04 | 12 |
| 4.35 | 8 | 10.55 | 8 | 16.74 | 55 | 22.94 | 501 | 29.13 | 916 | 35.32 | 992 | 41.51 | 879 | 47.70 | 645 | 53.88 | 381 | 60.07 | 12 |
| 4.38 | 9 | 10.58 | 7 | 16.78 | 60 | 22.97 | 499 | 29.16 | 911 | 35.35 | 992 | 41.54 | 873 | 47.73 | 645 | 53.91 | 383 | 60.10 | 12 |
| 4.41 | 10 | 10.61 | 5 | 16.81 | 57 | 23.00 | 505 | 29.19 | 911 | 35.38 | 993 | 41.57 | 872 | 47.76 | 642 | 53.94 | 381 | 60.13 | 12 |
| 4.44 | 9 | 10.64 | 4 | 16.84 | 60 | 23.03 | 505 | 29.22 | 911 | 35.41 | 992 | 41.60 | 879 | 47.79 | 646 | 53.98 | 378 | 60.16 | 12 |
| 4.48 | 9 | 10.67 | 5 | 16.87 | 63 | 23.06 | 513 | 29.26 | 918 | 35.45 | 990 | 41.63 | 876 | 47.82 | 648 | 54.01 | 375 | 60.19 | 12 |
| 4.51 | 9 | 10.70 | 5 | 16.90 | 64 | 23.09 | 515 | 29.29 | 915 | 35.48 | 990 | 41.67 | 869 | 47.85 | 642 | 54.04 | 372 | 60.22 | 11 |
| 4.54 | 9 | 10.73 | 4 | 16.93 | 65 | 23.12 | 522 | 29.32 | 925 | 35.51 | 994 | 41.70 | 866 | 47.88 | 640 | 54.07 | 371 | 60.25 | 11 |
| 4.57 | 9 | 10.77 | 5 | 16.96 | 64 | 23.16 | 524 | 29.35 | 921 | 35.54 | 1001 | 41.73 | 865 | 47.91 | 639 | 54.10 | 371 | 60.28 | 11 |
| 4.60 | 9 | 10.80 | 4 | 16.99 | 66 | 23.19 | 529 | 29.38 | 919 | 35.57 | 1003 | 41.76 | 857 | 47.94 | 636 | 54.13 | 369 | 60.31 | 11 |
| 4.63 | 9 | 10.83 | 4 | 17.02 | 70 | 23.22 | 527 | 29.41 | 917 | 35.60 | 997 | 41.79 | 854 | 47.98 | 639 | 54.16 | 367 | 60.34 | 12 |
| 4.66 | 9 | 10.86 | 3 | 17.05 | 69 | 23.25 | 524 | 29.44 | 913 | 35.63 | 1002 | 41.82 | 850 | 48.01 | 643 | 54.19 | 367 | 60.38 | 11 |
| 4.69 | 9 | 10.89 | 3 | 17.09 | 73 | 23.28 | 524 | 29.47 | 914 | 35.66 | 992 | 41.85 | 846 | 48.04 | 641 | 54.22 | 365 | 60.41 | 11 |
| 4.72 | 9 | 10.92 | 3 | 17.12 | 72 | 23.31 | 527 | 29.50 | 913 | 35.69 | 994 | 41.88 | 846 | 48.07 | 634 | 54.25 | 360 | 60.44 | 11 |
| 4.75 | 8 | 10.95 | 3 | 17.15 | 76 | 23.34 | 530 | 29.53 | 911 | 35.72 | 993 | 41.91 | 841 | 48.10 | 635 | 54.28 | 355 | 60.47 | 12 |
| 4.78 | 9 | 10.98 | 3 | 17.18 | 74 | 23.37 | 536 | 29.56 | 915 | 35.76 | 995 | 41.94 | 832 | 48.13 | 629 | 54.32 | 355 | 60.50 | 12 |
| 4.82 | 9 | 11.01 | 2 | 17.21 | 74 | 23.40 | 535 | 29.60 | 916 | 35.79 | 993 | 41.97 | 833 | 48.16 | 630 | 54.35 | 353 | 60.53 | 13 |
| 4.85 | 9 | 11.04 | 2 | 17.24 | 75 | 23.43 | 541 | 29.63 | 917 | 35.82 | 988 | 42.01 | 837 | 48.19 | 632 | 54.38 | 352 | 60.56 | 13 |
| 4.88 | 9 | 11.08 | 3 | 17.27 | 74 | 23.47 | 545 | 29.66 | 913 | 35.85 | 982 | 42.04 | 838 | 48.22 | 633 | 54.41 | 346 | 60.59 | 14 |
| 4.91 | 9 | 11.11 | 3 | 17.30 | 74 | 23.50 | 548 | 29.69 | 916 | 35.88 | 982 | 42.07 | 837 | 48.25 | 633 | 54.44 | 346 | 60.62 | 14 |
| 4.94 | 9 | 11.14 | 5 | 17.33 | 75 | 23.53 | 550 | 29.72 | 919 | 35.91 | 979 | 42.10 | 841 | 48.29 | 633 | 54.47 | 343 | 60.65 | 14 |
| 4.97 | 9 | 11.17 | 5 | 17.36 | 74 | 23.56 | 560 | 29.75 | 919 | 35.94 | 986 | 42.13 | 843 | 48.32 | 626 | 54.50 | 345 | 60.68 | 14 |
| 5.00 | 10 | 11.20 | 6 | 17.40 | 77 | 23.59 | 566 | 29.78 | 916 | 35.97 | 985 | 42.16 | 843 | 48.35 | 624 | 54.53 | 344 | 60.72 | 14 |
| 5.03 | 10 | 11.23 | 6 | 17.43 | 77 | 23.62 | 572 | 29.81 | 911 | 36.00 | 989 | 42.19 | 837 | 48.38 | 628 | 54.56 | 342 | 60.75 | 15 |
| 5.06 | 10 | 11.26 | 6 | 17.46 | 79 | 23.65 | 571 | 29.84 | 918 | 36.03 | 981 | 42.22 | 840 | 48.41 | 633 | 54.59 | 342 | 60.78 | 15 |
| 5.09 | 10 | 11.29 | 6 | 17.49 | 84 | 23.68 | 570 | 29.87 | 922 | 36.06 | 975 | 42.25 | 847 | 48.44 | 628 | 54.62 | 342 | 60.81 | 14 |
| 5.13 | 9 | 11.32 | 7 | 17.52 | 86 | 23.71 | 571 | 29.91 | 919 | 36.10 | 979 | 42.28 | 850 | 48.47 | 623 | 54.66 | 340 | 60.84 | 14 |
| 5.16 | 10 | 11.35 | 7 | 17.55 | 90 | 23.74 | 576 | 29.94 | 917 | 36.13 | 980 | 42.32 | 850 | 48.50 | 615 | 54.69 | 338 | 60.87 | 14 |
| 5.19 | 10 | 11.39 | 6 | 17.58 | 91 | 23.78 | 577 | 29.97 | 918 | 36.16 | 985 | 42.35 | 852 | 48.53 | 609 | 54.72 | 337 | 60.90 | 14 |
| 5.22 | 10 | 11.42 | 5 | 17.61 | 94 | 23.81 | 578 | 30.00 | 918 | 36.19 | 982 | 42.38 | 844 | 48.56 | 609 | 54.75 | 339 | 60.93 | 14 |
| 5.25 | 10 | 11.45 | 5 | 17.64 | 97 | 23.84 | 578 | 30.03 | 920 | 36.22 | 979 | 42.41 | 842 | 48.59 | 605 | 54.78 | 337 | 60.96 | 13 |
| 5.28 | 10 | 11.48 | 4 | 17.67 | 100 | 23.87 | 577 | 30.06 | 922 | 36.25 | 981 | 42.44 | 844 | 48.63 | 605 | 54.81 | 339 | 60.99 | 13 |
| 5.31 | 10 | 11.51 | 4 | 17.71 | 102 | 23.90 | 573 | 30.09 | 922 | 36.28 | 974 | 42.47 | 841 | 48.66 | 608 | 54.84 | 336 | 61.02 | 13 |
| 5.34 | 9 | 11.54 | 3 | 17.74 | 104 | 23.93 | 580 | 30.12 | 926 | 36.31 | 970 | 42.50 | 837 | 48.69 | 607 | 54.87 | 336 | | |
| 5.37 | 8 | 11.57 | 4 | 17.77 | 103 | 23.96 | 582 | 30.15 | 933 | 36.34 | 975 | 42.53 | 839 | 48.72 | 607 | 54.90 | 334 | | |
| 5.40 | 8 | 11.60 | 3 | 17.80 | 101 | 23.99 | 589 | 30.18 | 933 | 36.37 | 976 | 42.56 | 836 | 48.75 | 604 | 54.93 | 330 | | |
| 5.44 | 8 | 11.63 | 3 | 17.83 | 100 | 24.02 | 592 | 30.21 | 930 | 36.41 | 975 | 42.59 | 833 | 48.78 | 604 | 54.96 | 329 | | |
| 5.47 | 8 | 11.66 | 4 | 17.86 | 98 | 24.05 | 591 | 30.25 | 930 | 36.44 | 966 | 42.62 | 828 | 48.81 | 601 | 55.00 | 322 | | |
| 5.50 | 8 | 11.70 | 4 | 17.89 | 101 | 24.08 | 590 | 30.28 | 939 | 36.47 | 970 | 42.66 | 821 | 48.84 | 601 | 55.03 | 322 | | |
| 5.53 | 8 | 11.73 | 5 | 17.92 | 102 | 24.12 | 587 | 30.31 | 943 | 36.50 | 967 | 42.69 | 816 | 48.87 | 621 | 55.06 | 322 | | |
| 5.56 | 7 | 11.76 | 5 | 17.95 | 104 | 24.15 | 595 | 30.34 | 943 | 36.53 | 964 | 42.72 | 822 | 48.90 | 617 | 55.09 | 319 | | |
| 5.59 | 7 | 11.79 | 6 | 17.98 | 106 | 24.18 | 597 | 30.37 | 943 | 36.56 | 965 | 42.75 | 821 | 48.93 | 611 | 55.12 | 315 | | |
| 5.62 | 6 | 11.82 | 6 | 18.01 | 109 | 24.21 | 604 | 30.40 | 950 | 36.59 | 965 | 42.78 | 818 | 48.97 | 611 | 55.15 | 312 | | |

(segue) H60, distanza sorgente rivelatore = 200 cm.

[illegible]

Bibliografia

- [1] International Organization for Standardization, *X and gamma reference radiation for calibrating dosimeters and dose-rate meters and for determining their response as a function of photon energy - Part 1: Radiation characteristics and production methods*, International Standard ISO 4037-1, 1997.
- [2] International Commission on *Radiation Units and Measurements*, *Conversion coefficients for use in radiological protection against external radiation*, *ICRU Report 57*, Bethesda, MD, 1 August 1998.
- [3] Laitano R.F., Toni M.P., *Condizioni e procedure sperimentali per il riconoscimento dei centri secondari di taratura per le grandezze esposizione (X) e kerma in aria (K_a) relative alla radiazione X e gamma*, ENEA, Serie Edizione Scientifiche, 1992.
- [4] International Organization for Standardization, *X and gamma reference radiation for calibrating dosimeters and dose-rate meters and for determining their response as a function of photon energy - Part 2: Dosimetry for radiation protection over the energy ranges 8 keV to 1.3 MeV and 4 MeV to 9 MeV*, International Standard ISO 4037-2, 1997.
- [5] International Organization for Standardization, *X and gamma reference radiation for calibrating dosimeters and dose-rate meters and for determining their response as a function of photon energy - Part 3: Area and personal dosimeters*, International Standard ISO 4037-3, 1996.
- [6] International Organization for Standardization, *X and gamma reference radiation for calibrating dosimeters and dose-rate meters and for determining their response as a function of photon energy - Part 4: Calibration of area and personal dosimeters in low energy reference radiation fields*, International Standard ISO 4037-4 (2000).
- [7] Laitano R.F., Toni M.P., Pani R., Pellegrini R., *Energy distributions and air Kerma rates of ISO and BIPM reference filtered X-radiations*, ENEA, Serie Edizione Scientifiche, 1990.
- [8] Drake, K.-H and Böhm, J., *Automatisierter Meßstand für die Dosimetrie mit Betastrahlung*. PTB-Bericht, PTB-Dos-19 (1990).

- [9] Hubbel, J.H. and Seltzer, S.M., Tables of X-ray mass attenuation coefficients and mass energy absorption coefficients 1 keV to MeV for elements Z=1 to 92 and 48 additional substances of dosimetric interest, NIST, NISTIR 5632, 1995.
- [10] Hakanen A., Kosunen A., Pory P., Tapiovaara M., *Determination of conversion factors from air kerma to operational dose equivalent quantities for low-energy X-ray spectra*, Radiat. Prot. Dosim. ,2006.
- [11] Ankerhold U., Behrens R. and Ambrosi P., *X-ray spectrometry of low energy photons for determining conversion coefficients from air kerma, K_a , to personal dose equivalent, $H_p(10)$, for radiation qualities of the ISO narrow spectrum series*, Radiat. Prot. Dosim. **81**(4), 247-258 (1999).
- [12] Ankerhold U., *Catalogue of X-ray and their characteristic data-ISO and DIN radiation qualities, therapy and diagnostic radiation qualities, unfiltered X-ray spectra*, PTB-Bericht, PTB-Dos-34 (2000).
- [13] Kharrati H., Zarrad B., *Computation of conversion coefficients relating air kerma to $H_p(0,07,\alpha)$, $H_p(10,\alpha)$ and $H^*(10)$ for X-ray narrow spectrum from 40 to 140 keV*, Med. Phys. **31**(2), 277-284 (2004).
- [14] International Commission on Radiation Units and Measurements, *Quantities and units in radiation protection dosimetry, ICRU Report 51*, Bethesda, MD, 1 september 1992.
- [15] Till E., Zankl M., Drexler G., *Angular dependence of depth doses in a tissue slab irradiated with monoenergetic photons*, GSF-Bericht 27/95, Munchen, (1995).
- [16] Grobwendt B., *Angular dependence factors and kerma to dose equivalent conversion coefficients for cylindrical phantoms irradiated by plane-parallel extended monoenergetic photon beams*, Radiat. prot. Dosim, **59**, (1995).
- [17] International Commission on Radiation Units and Measurements, *Measurement of dose equivalent from external photon and electron radiations, ICRU Report 47*, Bethesda, MD, 1992.
- [18] Tsoufanidis N., *Measurement and detection of radiation*, Hemisphere Publishing Corporation, 1983.
- [19] Burns P.A., Lindsay J. Martin and John R. Moroney, *Needle Beam Studies Of HPGe Detectors For Photon Efficiency Calibration From 6 To 25 keV*, 480 Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A286 (1990) 480-489 North-Holland.
- [20] Salgado, Conti, Becker, *Determination of HPGe detector response using MCNP5 for 20-150 keV X-rays*, Applied radiation and Isotopes 64 (2006), 700-705.

- [21] Ewa I.O.B., Bodizs D., Czifrus Sz., Molnar Zs., *Monte Carlo determination of full energy peak efficiency for a HPGe detector*, Applied Radiation and Isotopes 55 (2001) 103–108.
- [22] Debertin and Pefara, *Calibration of High-purity Germanium Detectors in the Energy Range from 25 to 122 keV*, Nuclear Instruments And Methods I40 (I977) 337-340.
- [23] Debertin K., Furnari J.C. and Walz K.F. *Standard Sources for the Efficiency Calibration of Photon Detectors in the Energy Range from 5 to 40 keV*, Int. J. Appl Radiat. Isor. Vol. 36, No. 12, pp. 977-980, 1985.
- [24] Savitzky A., Golay M.J.E., *Smoothing and Differentiation of data by simplified least squares procedures*, Analytical Chemistry 36(8): 1627-1639, July 1964.
- [25] Para Foglio A., *Misure e strumentazione nucleare*, Edizioni CUSL, 1996.
- [26] Seelentag W.W., Panzer W., *Stripping of X-ray bremsstrahlung spectra up to 300 kV_p on a desk type computer*, Phys. Med. Biol., 1979, vol. 24, No.4, 767-780.
- [27] Zevallos-Chavez J.Y., da Cruz M.T.F., et al., *Response function of a germanium detector to photon energies between 6 and 120 keV*, Nuclear Instruments and methods in physics Research A 457, 212-219, 2001.
- [28] Kluson J., *Environmental monitoring and in situ gamma spectrometry, Radiation Physics and chemistry*, 61, 209-216, 2001.
- [29] Beach S.M., DeWerd L.A., *Deconvolution and reconstruction techniques of closely spaced low-energy spectra from high-purity germanium spectrometry*, Nuclear Instruments and methods in physics Research A 572, 794-803, 2007.
- [30] Plagnard J., Bobin C., Lépy MC, *Accurate efficiency calibration of a low-energy HPGe detector using a monochromatic x-ray source*, X-ray spectrometry 2007; 36, 191-198.
- [31] Lépy MC, Campbell JL, Laboire JM, Plagnard J., Stemmler P., Teesdale WJ, *Experimental study of the response of semiconductor detectors to low-energy photons*, Nuclear Instruments and methods in physics Research A 439, 239-246, 2000.
- [32] Yilamz E., Can C., *Photoelectron, Compton and characteristic x-ray escape from an HPGe Detector in the range 8-52 keV*, X-ray spectrometry 2004; 33, 439-446.
- [33] Rajput MU, Ahmad M., Amhad W., *Characteristic absolute efficiency response curves of a high purity detector in the energy range 50-1500 keV*, Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, Vol. 251, No 3 (2002), 457-462.

- [34] Rosner B., Mingay DW, *Properties of intrinsic germanium detectors at low energies by escape peak spectroscopy*, X-ray spectrometry 1983; No 2, 82-86.
- [35] Nogueira MS, Mota HC, Campos LL, *(HP)Ge measurement of spectra for diagnostic x-ray beams*, Radiat. Prot. Dosim. Vol 111, No 1, 105-110 (2004).
- [36] Ankerhold U., *X reference radiation qualities produced with tube voltages above 300 kV for the calibration and testing of doseimeters*, Radiat. Prot. Dosim. Vol 123, No 2, 137-142 (2006).
- [37] Fehrenbacher G., Meckbach R., Jacob P., *Unfolding the response of a Ge detector used for in-situ gamma-ray spectrometry*, Nuclear Instruments and methods in physics Research A 383, 454-462, 1996.
- [38] Kmboj S., Kahn B., *Use of Monte Carlo simulation to examine gamma-ray interactions in germanium detectors*, Radiation Measurements 37 (2003) 1-8.
- [39] Keyser RM, *Resolution and sensitivity as a function of energy and incident geometry for germanium detectors*, Nuclear Instruments and methods in physics Research B 213, 236-240, 2004.
- [40] Birch R., Marshall M., *Computation of bremsstrahlung x-ray spectra and comparison with spectra measured with a Ge(Li) detector*, Phys. Med. Biol., 1979, Vol.24, No 3, 505-517.
- [41] Peroz R., Can C., *Components of detector response function: Monte Carlo simulations and experiment*, X-ray spectrometry 2006; 35, 347-351.
- [42] Can C., Bilgici SZ, *An investigation of x-ray escape for an HPGe detector*, X-ray spectrometry 2003; 32, 276-279.
- [43] Can C., *Escape of photoelectrons and Compton-scattered photons from an HPGe detector*, X-ray spectrometry 2003; 32, 280-284.
- [44] Delgado Martinez V., Mainardi RT, Barrea RA, Martinez Hidalgo C., Derosa PA, Arbolí MM, *Parametric equation for the efficiency curve of germanium detectors*, X-ray spectrometry 1998; 27, 321-324.
- [45] Debertin K., Furnari JC, Walz KF, *Standard sources for the efficiency calibration of photon detectors in the energy range from 5 to 40 keV*, Int. J. Appl. Radiat. Isot. Vol. 36, No 12, pp. 970-980, 1985.
- [46] Pani R., Laitano RF, Pellegrini R, *Diagnostic x-ray spectra measurements using a silicon surface barrier detector*, Phys. Med. Biol., 1987, Vol. 32, No 9, 1135-1149.
- [47] Lépy MC, Plagnad J., Ferreux L., *Study of the response function of a HPGe detector for low-energy X-rays*, Nuclear Instruments and methods in physics Research A 505, 290-293, 2003.

- [48] Lembo L., I. Sermenghi, *Realizzazione di una camera monitor per il controllo della stabilità dei fasci di raggi X*, CNEN, 1973.
- [49] Bartolotta A., Pugliani L., Salvadori P., *Realizzazione di una camera a ionizzazione ad aria libera per il controllo di stabilità di un fascio di raggi X di bassa energia*, ISSN 0390-6485, 1983.
- [50] Ankerhold U., Behrens R. Ambrosi P., *A prototype ionisation chamber as a secondary standard for the measurement of the personal dose equivalent, $H_p(10)$, on a slab phantom*, Radiat. Prot. Dosim. Vol 86, No 3, 167-173 (1999).
- [51] Ankerhold U., Ambrosi P., Eberle T., *A chamber for determining the conventionally true value of $H_p(10)$ and $H^*(10)$ needed by calibration laboratories*, Radiat. Prot. Dosim. Vol 96, Nos 1-3, 133-137 (2001).
- [52] Fabrizi FR, Pugliani L., Bartolotta A., *Realization of reference x-ray beams and of an exposure secondary standard in the medium energy range*, Physica Medica Vol VII, N 1, 1991.
- [53] Bartolotta A., Pugliani L., *A new italic calibration facility in the soft x-ray region*, IAEA-SM-298/91.
- [54] Bartolotta A. et al, *The free-air ionization chamber for low energy x-rays of the Istituto Superiore di Sanità*, Physica Medica Vol 1, pp 9-17, 1987.
- [55] Bartolotta A., Pugliani L., Salvadori P., *A primary exposure standard for x-rays in the (30-150) keV range*, Il Nuovo Cimento Vol 4D, No 4, 1984.
- [56] Bartolotta A., Fabrizi FR, Pugliani L., *ISS-BIPM intercomparison between exposure primary standards in the soft x-ray region (10 to 50 keV)*, Physica Medica Vol 3-4, pp 185-192, 1988.
- [57] Kramer HM, *On the use of conversion coefficients from air kerma to the ICRU quantities for low energy X ray spectra*, Radiat. Prot. Dosim. Vol 54, Nos 3-4, pp 213-215 (1994).
- [58] Briesmeister J.F., (Editor), MCNP6, *A General Monte Carlo N-Particle Transport Code*, Version 4C, LA-13709-M, Los Alamos, NM, USA (April 2000).